

Technische Richtlijn Drainagetechnieken

POV

MACRO
STABILITEIT

pov
Piping



Auteurs: ir. J. (Hans) Niemeijer (Arcadis), ing. O.S. (Onno) Langhorst (Movares),
ir. J.J. (Hans) van Meerten (Deltares), ir. H.D.C. (Hendrik) Meuwese
(Witteveen+Bos) en Dr.Ir. G.A.M. (Gerard) van Meurs (Deltares,
projectleider)

Datum: 1 maart 2018

Versie: definitief, versie 1.1



1 maart 2018, definitief, versie 1.1

Titel

Technische Richtlijn Drainagetechnieken

Project

1221098-002

Kenmerk

1221098-002-GEO-0006

Pagina's

160

Samenvatting

Het optreden van de faalmechanismen macro-instabiliteit en piping zijn mede afhankelijk van de waterspanning in de dijk en in de ondergrond. De aanleg van een drainagesysteem zorgt voor een verlaging van de waterspanning. Op verzoek van de POV-Macro stabiliteit en de POV-Piping is een technische richtlijn (TR) opgesteld. In de richtlijn wordt aandacht gegeven aan de waterveiligheidsfilosofie, het ontwerp, het realiseren, het beheer en het onderhoud van een drainagesysteem. Bovendien wordt aandacht besteed aan de monitoring van het systeem.

Versie	Datum	Auteurs	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	okt. 2017	ir. J. Niemeijer					
1.1	maart 2018	ing. O.S Langhorst					
		ir. J.J. van Meerten					
		ir. H.D.C. Meuwese					
		dr.ir. G.A.M. van Meurs		ing. H.T.J. de Bruijn		ir. L. Voogt	

1 maart 2018, definitief, versie 1.1

Titel

Technische Richtlijn Drainagetechnieken

Project

1221098-002

Kenmerk

1221098-002-GEO-0006

Pagina's

160

Voorwoord

In het kader van het HoogWaterBescherminingsProgramma (HWBP), de alliantie tussen RWS en alle waterschappen, is een Project Overstijgende Verkenning Macrostabiliteit (POVM) ingesteld (2015-2018). Het HWBP, het bedrijfsleven en de kennisinstututen zoeken hierin samen naar innovaties om het faalmechanisme 'macrostabiliteit' effectiever te kunnen aanpakken. Het doel daarbij is om dijkversterking beter, sneller en goedkoper te realiseren. Trekker van dit proces is het Waterschap Rivierenland.

Een van de clusters in de POVM is: 'Innovaties in uitvoeringstechnieken' waarin een aantal technieken is / wordt onderzocht (drainagesystemen, vernagelingstechnieken, grondverbeteringstechnieken en langsconstructies). Voor elk van deze technieken wordt een Technische Richtlijn opgesteld. De voorliggende Technische Richtlijn gaat over de techniek 'Drainagesystemen'.

Ook binnen de POV Piping wordt aandacht besteed aan drainagetechnieken, als maatregel om piping te voorkomen. De POV Piping heeft daarom meegewerkt aan de totstandkoming van deze Technische Richtlijn.

Omdat deze richtlijnen de leidraad vormen bij dijkversterkingsprojecten, is het van groot belang dat de inhoud ervan breed wordt gedragen door de sector. Om dat te borgen heeft SBRCURnet per techniek een commissie van deskundigen samengesteld (een Klankbordgroep).

Voor 'Drainagesystemen' was de samenstelling van SBRCURnet commissie 2457 (de Klankbordgroep) als volgt:

Leden Klankbordgroep	Organisatie
Ing. C.A. (Claudia) van Ackooij	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Drs. B.M. (Bas) Berbee	Fugro GeoServices B.V.
Ing. H.T.J. (Huub) de Bruijn	Deltares
P.J.M. (Peter) Damen	Waterschap Rivierenland
Ir. J.W. (Jeroen) Dijkstra	Cofra B.V.
J. (Jes) Kaihatu	Waterschap Zuiderzeeland
Ir. B. T. van (Bouke) Meekeren	Antea Group
Ir. M.P. (Michiel) Mulwijk	BAM Infraconsult bv
Ir. M.H. (Marius) de Nijs	Movares Nederland B.V.
Ir. J. (Jeroen) Rindertsma	Van Oord Dredging and Marine Contractors bv
Ir. R.D. (Ruben) Rothuizen	Visser & Smit Hanab B.V.
Ir. J.T.M. (Hans) van der Sande	Waterschap Scheldestromen

1 maart 2018, definitief, versie 1.1

Titel

Technische Richtlijn Drainagetechnieken

Project

1221098-002

Kenmerk

1221098-002-GEO-0006

Pagina's

160

Leden Klankbordgroep	Organisatie
Ir. M. (Monique) Sanders	Royal HaskoningDHV
Ing. T.J. (Martin) Schepers MPM	POV Macrostabiliteit
D. (Dirk) van Schie	POV Macrostabiliteit
Ir. J. (Jana) Steenbergen-Kajabová	Sweco Nederland B.V.
Ir. M.J.H. (Mark) van der Valk	Aveco de Bondt
Dr.ir. M.A. (Meindert) Van	POV Macrostabiliteit
Ir. R. (Roel) van der Veen	Waterschap Rivierenland
Ing. T.C. (Thomas) Viehöfer	HaskoningDHV Nederland B.V.
Ir. J.W. (Jan-Willem) Vink	Cofra B.V.
Ir. L.W.A. (Leo) Zwang	Fugro GeoServices B.V.
Ing. A. (Fred) Jonker	SBRCURnet, voorzitter

Het schrijfteam voor deze rapportage bestond uit de volgende personen:

Leden Schrijfteam	Organisatie
Ir. J. (Hans) Niemeijer	Arcadis
Ir. J.J. (Hans) van Meerten	Deltares
Ir. H.D.C (Hendrik) Meuwese	Witteveen+Bos
Ing. O.S. (Onno) Langhorst	Movares Nederland B.V.
Dr.ir. G.A.M. (Gerard) van Meurs	Deltares (projectleider)

De veiligheidsbenadering in relatie tot drainagetechnieken is beschreven in hoofdstuk 3. Een verdere uitwerking van deze benadering is opgenomen in het ontwerp van een drainage in hoofdstuk 5. Ed Calle en Wim Kanning hebben een review uitgevoerd voor beide hoofdstukken. De overall review is uitgevoerd door Huub de Bruijn.

De inhoud van deze rapportage is gebaseerd op de thans beschikbare kennis en ervaring. SBRCURnet heeft als rol om nieuwe kennis en ervaring, die met deze rapportage in de komende jaren wordt opgedaan, (met regelmaat) in nauwe samenspraak met de sector te verwerken in een herziene versie.

De POV-Macrostabiliteit, POV-Piping en SBRCURnet spreken hun dank uit aan de leden van het Schrijfteam en aan de Klankbordgroep, die met veel inzet en enthousiasme en in samenwerking met diverse partijen hebben samengewerkt aan de realisatie van deze rapportage.

Dit rapport is ook uitgegeven onder het Deltares nummer: 1221098-002-GEO-0006.

Tiel, 10 oktober 2017



1 maart 2018, definitief, versie 1.1

Titel

Technische Richtlijn Drainagetechnieken

Project

1221098-002

Kenmerk

1221098-002-GEO-0006

Pagina's

160

Ing. T.J. Schepers MPM
Programmaleider POV-Macrostablieiteit

Dr.ir. M.A. (Meindert) Van
Technisch Manager POV-Macrostablieiteit

Drs.ing. H.H.H. Weijers PMSE
Programmaleider POV-Piping

Ing. A. Jonker
SBRCURnet Programmamanager
Geotechniek en Bodem

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Context	1
1.2 Positie technische richtlijn ten opzichte van WBI-2017	1
1.2.1 Beoordelen	1
1.2.2 Ontwerpen	4
1.2.3 Doelgroep	4
1.3 Waar en wanneer kunnen drainagetechnieken worden toegepast?	4
1.4 Belangrijk historisch en recent onderzoek	5
1.5 Totstandkoming van TR Drainagetechnieken	6
1.6 TR-macrostabiliteit	6
1.7 OR Zandmeevoerende Wellen en OI	6
1.8 Leeswijzer	6
2 Drainagetechnieken	8
2.1 Algemeen	8
2.2 Wisselwerking tussen drainagesysteem, geotechniek en watersysteem	8
2.3 Overzicht van technieken	9
2.3.1 Verticale bron	9
2.3.2 Horizontale drain	10
2.3.3 Grindkoffer	11
2.4 Kosten aanleg en beheer drainagetechniek	12
2.4.1 Afwegings- en toepassingscriteria voor iedere techniek	13
2.4.2 Toepasbaarheid richtlijn	13
3 Veiligheidsbenadering in relatie tot drainagetechnieken	14
3.1 Wettelijk kader en normstelling voor beoordelen, ontwerpen, beheren	14
3.2 Veiligheidsbenadering uitgaande van het WBI-2017 en OI2014	14
3.2.1 Ontwerpen of beoordelen	14
3.2.2 Faalmechanisme macro-instabiliteit en drainage	15
3.2.3 Faalmechanisme piping en drainage	16
3.2.4 Faalmechanisme micro-instabiliteit en drainage	17
3.2.5 Belastingen	18
3.2.6 Opzet van de faalkansanalyse	18
3.3 Betrouwbaarheid van drainagetechnieken	21
3.3.1 Afdekken van onzekerheden	21
3.3.2 Foutenboom	22
3.3.3 Aantonen van betrouwbaarheid van een dijk met drainageconstructies	23
3.3.4 Aantonen van betrouwbaarheid van de drainagetechnieken	24
3.4 Betrouwbaarheid van drainagetechnieken	24
3.4.1 Algemeen	24
3.4.2 Veiligheidsbenadering deel 1: niveau normtraject	25
3.4.3 Veiligheidsbenadering deel 2: niveau doorsnede	25
3.4.4 Veiligheidsbenadering deel 3: niveau drainagetechniek	28
3.4.5 Maatregelen om faalkansen van onderdelen te verkleinen	31
4 Geohydrologische systeemanalyse	34
4.1 Algemeen	34

1221098-002-GEO-0006, 1 maart 2018, definitief, versie 1.1

4.1.1	Geohydrologie en grondmechanica	34
4.1.2	Inleiding over waterspanningen	34
4.1.3	Betekenis voor de inzet van drainage	35
4.1.4	Stappenplan voor modellering	37
4.2	Opzet en uitwerking ondergrondmodel	41
4.2.1	Informatie ter bepaling van de bodemopbouw	41
4.2.2	Informatie over grondwaterstanden en regionale grondwaterstroming	43
4.2.3	Detailleren van de ondergrondschematisatie	44
4.2.4	Bepalen van doorlatendheden	45
4.2.5	Berging van grondwater in de bodem	48
4.2.6	Rivierbodem en voorland	48
4.2.7	Onttrekkingen van grondwater	48
4.2.8	Schaalproblematiek	49
4.2.9	Heterogeniteit en anisotropie i.r.t. drainagetechnieken.	50
4.2.10	Metingen na plaatsing van een drainagesysteem	51
4.3	Uitvoering van grondonderzoek	52
4.3.1	Voorschriften voor uitvoering	52
4.3.2	Onderzoek van grondwaterstanden en stijghoogten	53
4.3.3	Veldproeven	55
4.3.4	Boringen, sonderingen en in-situ sondetechnieken	57
4.4	Opzet geohydrologisch model	57
4.4.1	Schaalgrootte en dimensie van het model	57
4.4.2	Vooronderzoek met analytische berekeningen	58
4.4.3	Analytische semi-3D-modellering ten behoeve van het voorontwerp	58
4.4.4	Onderzoek waterbezwaar met tweedimensionaal analytisch doorsnede	62
4.4.5	Numerieke modellering 2D of 3D voor uitwerking van het ontwerp	66
4.4.6	Modellering van bronnen	69
4.4.7	Oppervlaktewater (binnendijks, en waterstandsverloop)	71
4.4.8	Drainageweerstand in de polders	71
4.4.9	Oppervlaktewater buitendijks	72
4.4.10	Grondwateraanvulling vanuit neerslag	73
4.4.11	Aanwezige grondwateronttrekkingen	74
4.4.12	Grondwaterstanden	74
4.4.13	Keuze van rand- en beginvoorwaarden	74
4.5	Beschikbare computersoftware	75
4.5.1	Gestandaardiseerde modellen	75
4.5.2	Beschikbare regionale grondwatermodellen	75
4.5.3	Stationaire en niet-stationaire ijking	76
4.6	Van stijghoogten naar waterspanningen in het dijkprofiel	77
4.6.1	Aanpak	77
4.6.2	Uitwerking ten behoeve van beoordelingen	80
4.6.3	Uitwerking ten behoeve van ontwerp	81
5	Ontwerpen drainage	82
5.1	Algemeen	82
5.2	Ontwerpproces	82
5.2.1	Algemeen ontwerpproces	82
5.2.2	Ontwerpstappen drainagesysteem	83
5.3	Probleemanalyse	89
5.3.1	Piping	90
5.3.2	Macrostabiliteit	90

1221098-002-GEO-0006, 1 maart 2018, definitief, versie 1.1

5.4	Vaststellen eisen aan drainagesysteem	91
5.4.1	Waterveiligheidseisen: benodigde stijghoogteverlaging	91
5.4.2	Levensduur	92
5.4.3	Omgevingseisen	92
5.4.4	Gebruikerseisen: Beheer en onderhoud	93
5.5	Omgaan met onzekerheden	93
5.5.1	Algemeen	93
5.5.2	Modelonzekerheid - geohydrologische modellen	94
5.5.3	Werking drainagesysteem	94
5.5.4	Adaptief ontwerp	95
5.6	Ontwerp drainagesysteem	95
5.6.1	Algemeen	95
5.6.2	Keuze systeem	96
5.6.3	Faalkansanalyse drainagesysteem	96
5.6.4	Individuele faalkansen onderdelen systeem	99
5.6.5	Vergroten betrouwbaarheid drainagesysteem	100
6	Realiseren, testen en verwijderen	102
6.1	Uitvoeringsaspecten	102
6.1.1	Verticale bron	102
6.1.2	Horizontale drain	103
6.1.3	Grindkoffer	104
6.2	Testen van functioneren drainage	105
6.2.1	Wanneer testen	105
6.2.2	Mogelijke testen	105
6.3	Einde levensduur	106
7	Beheren, Beoordelen en Onderhouden	108
7.1	Inleiding	108
7.2	Inspectie- en onderhoudsplan	108
7.2.1	Onderhoudsstrategie	108
7.2.2	Inspectiestrategie	109
7.3	Bedieningsplan	109
7.4	Calamiteitenplan	109
7.5	Beoordelen	109
7.6	Uitvoering beheer taken	110
7.6.1	Inspectie methoden	110
7.6.2	Reinigingsmethoden	111
8	Procedures en besluitvorming	113
8.1	Uitgangspunten lozen overtollig water	113
8.1.1	Technische zaken	113
8.1.2	Praktische zaken	113
8.2	Juridische uitgangspunten	113
8.2.1	Zakelijk recht	114
8.2.2	Onteigening	114
8.2.3	Gedoogplicht	114
8.2.4	Onderhoud drainagesysteem	114
8.3	Procedures	115
8.3.1	Projectplan Waterwet / Projectbesluit Omgevingswet	115
8.3.2	Omgevingsvergunning strijdigheid bestemmingsplan	115

1221098-002-GEO-0006, 1 maart 2018, definitief, versie 1.1

8.3.3	Aanmeldingsnotitie voor de MER-beoordeling	115
8.3.4	Omgevingsvergunningen die niet van toepassing zijn	115
8.3.5	Omgevingsvergunning kappen	115
8.3.6	Ontheffing Provinciale Milieuverordening	115
8.4	Uitvoering	115
9	Rekenvoorbeelden	116
9.1	Rivierdijk I Schoonhovenseveer–Langerak (SLa) - waterontspanner	116
9.1.1	Inleiding	116
9.1.2	Algemene aanpak	116
9.1.3	Randvoorwaarden en uitgangspunten	117
9.1.4	Beschrijving – grondopbouw en geohydrologie	119
9.1.5	Uitwerking	125
9.1.6	Ontwerp van maatregelen	130
9.2	Rivierdijk II – Veessen (IJsseldijk) - DMC	132
9.2.1	Inleiding	132
9.2.2	Situatieschets	133
9.2.3	Systeemanalyse	133
9.2.4	Ontwerp	137
9.2.5	Monitoring	140
9.2.6	Beheer en onderhoud	141
9.3	Rivierdijk III – Spijk (Rijn) – Grindkoffer	142
9.3.1	Beschrijving – grondopbouw en geohydrologie	142
9.3.2	Uitwerking	142
9.3.3	Ontwerp van maatregelen	143
9.3.4	Beheer	144
10	Aanbevelingen	146
	Literatuur	148
	Symbolenlijst	152
	Begrippenlijst	154
	Bijlage(n)	
A	Ondergrondgegevens	A-1



1 Inleiding

1.1 Context

Macro-instabiliteit en Piping zijn faalmechanismen waardoor het functioneren van een waterkering in het geding kan komen. Het ontwerpen en realiseren van een drainageconstructie is een maatregel om het optreden van een dergelijk faalmechanisme te ondervangen. Een dergelijke maatregel moet dan wel goed worden ontworpen en uitgevoerd. Deze technische richtlijn (TR) drainagetechnieken is vervaardigd op initiatief van de POV¹ Macrostabiliteit in samenwerking met de POV Piping, en vormt daarbij een hulpmiddel. In het onderhavige rapport wordt alleen ingegaan op algemene ontwerpkeuzes die ten grondslag liggen aan een drainagesysteem.

In aparte Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijnen (OBR) die naar verwachting in de loop van 2017 uitkomen en die zullen verschijnen in het kader van POV-Piping, wordt ingegaan op de nadere dimensionering van verschillende typen drainagesystemen: een bronneringsstelsel, een DMC-systeem en een grindkoffer. In de toekomst zullen deze OBR's geïntegreerd gaan worden in de onderhavige TR.

1.2 Positie technische richtlijn ten opzichte van WBI-2017

Binnen de POV-Macrostabiliteit zijn vier technische richtlijnen geschreven. Deze richtlijnen sluiten aan bij de rapporten en leidraden van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017).

Op de ENW website staan diverse rapporten die geschreven zijn voor het ontwerpen van dijken, bijvoorbeeld het ontwerpen van rivierdijken of meerdijken. Tevens zijn er diverse deelrapporten over faalmechanismen of andere voor de dijken relevante onderwerpen. De rapporten en de status of ze vigerend zijn is terug te vinden op de ENW-website (www.enw.nl) die doorverwijst naar [de Kennisbank waterbouw van de TU Delft](#)).

De hoofdlijnen en definities voor waterveiligheid staan beschreven in de “Grondslagen voor hoogwaterbescherming” (ENW, 2016). Voor het beoordelen (voorheen toetsen genoemd) is een wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) beschikbaar. Voor het ontwerpen van een versterkingsmaatregel geldt dat het waterschap de randvoorwaarden vaststelt. Bovendien geldt dat een dijk met of zonder een constructie alleen moet voldoen aan de Waterwet. De eisen van het Bouwbesluit zijn niet van toepassing (ENW, 2016).

Op de beschikbare informatie voor beoordelen en voor ontwerpen van een dijk met een constructie volgens de Waterwet wordt hierna verder apart ingegaan.

1.2.1 Beoordelen

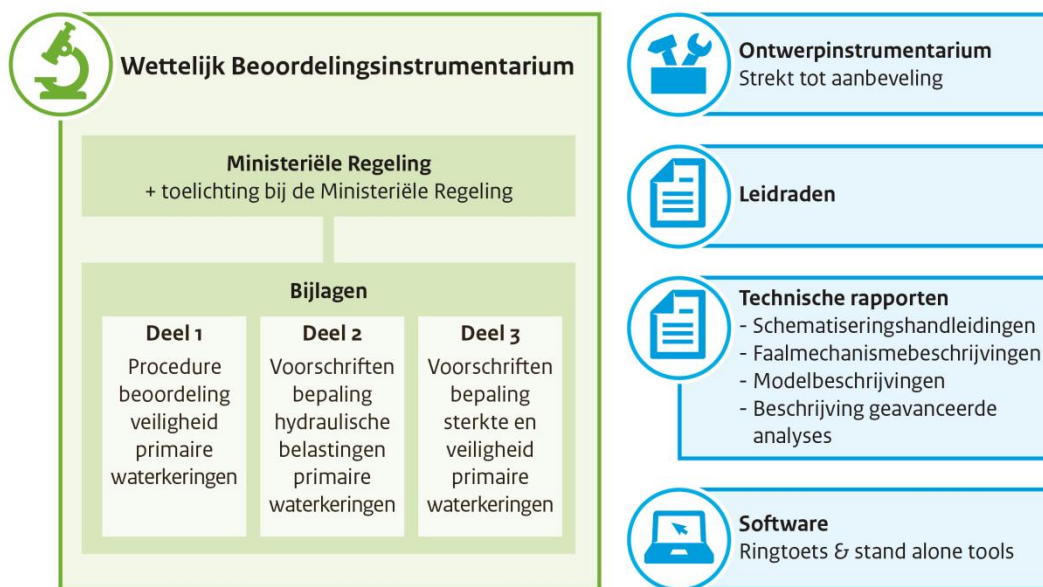
Het WBI 2017 voor de beoordelingsronde 2017-2023 bestaat uit de ministeriële regeling en drie bijlagen. De drie bijlagen zullen verder worden aangeduid als:

- WBI 2017 Bijlage I Procedure.
- WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen.
- WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.

¹ POV staat voor *Project Overstijgende Verkenning*



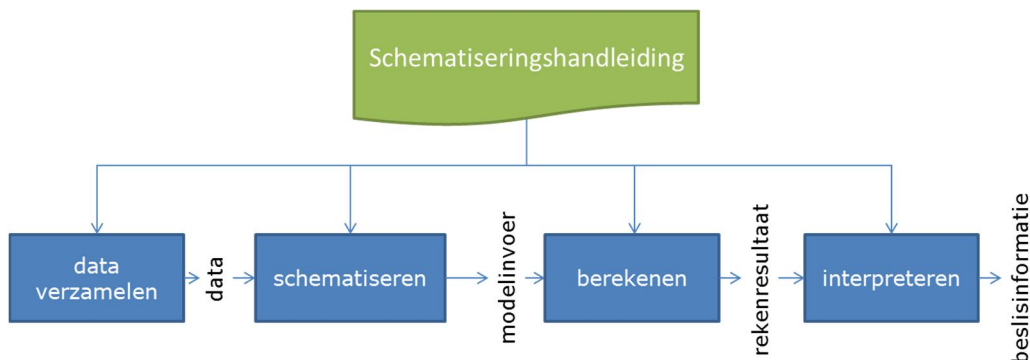
Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat vermeld in Figuur 1.1. Het basisrapport bij het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium voor de beoordelingsperiode 2017-2023 (basisrapport WBI 2017 versie 1.1) beschrijft de inhoudelijke uitgangspunten bij het beoordelingsinstrumentarium.



Figuur 1.1 Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten

Voor de faalmechanismen en faalkansen staan onder andere definities en eenvoudige toetsregels in 'Bijlage III bij de ministeriële regeling'.

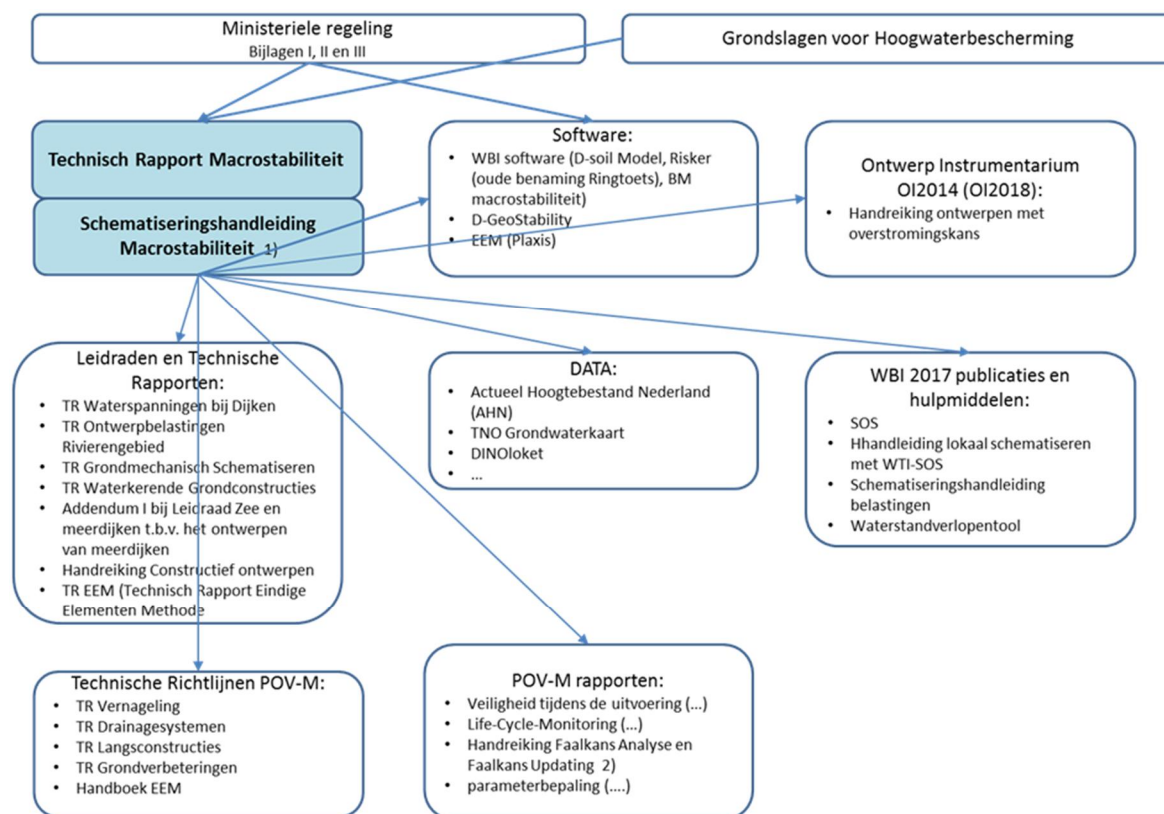
Het schematiseren van een dijk zonder een constructie staat in de schematiseringshandleidingen. Voor elk faalmechanisme is een dergelijke handleiding beschikbaar in WBI2017. Specifiek voor Macrostabiliteit (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2016b) is deze handleiding beschikbaar via de helpdesk water (www.helpdeskwater.nl), net als voor piping (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017), etc. Deze schematiseringsleidraad beschrijft hoe vanuit data een schematisering wordt gemaakt en hoe er vervolgens met een veiligheidsbenadering een berekening wordt gemaakt voor een 'groene dijk', zie Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Activiteiten zoals beschreven in de schematiseringshandleiding



De schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type en de benodigde hoeveelheid aan onderzoek om tot een goede schematisering te kunnen komen. Verder ondersteunt de schematiseringshandleiding gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordeling kunnen worden toegepast. De wijze waarop gegevens ingewonnen moeten worden (bijvoorbeeld hoe veldonderzoek of laboratoriumonderzoek uitgevoerd wordt) wordt slechts summier behandeld. Hier zijn aparte protocollen voor beschikbaar en deze protocollen worden in het Technisch Rapport Macrostabiliteit (TRMD) opgenomen. De schematiseringshandleidingen zijn specifiek opgesteld voor het beoordelen van primaire waterkeringen en kunnen daarom niet zomaar worden toegepast voor andere doeleinden, zoals regionale keringen, ontwerp, et cetera. De schematiseringshandleiding en het TRMD (nog in ontwikkeling per sept 2018) vormen de basis van macrostabiliteit voor een 'groene' dijk, dat wil zeggen een dijk zonder constructie. De technische richtlijnen die de POVM maakt, gebruiken deze basis en veronderstellen deze basis als bekend. Een en ander is weergegeven in Figuur 1.3.



1) Evt. ook Schematiseringshandleiding afschuiving voorland

2) Dit rapport is geschreven in opdracht van RWS WVL

Figuur 1.3 De positie van de technische richtlijnen met als basis het Technisch Rapport Macrostabiliteit² en de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit

De vigerende leidraden en technische rapporten, waaronder die in Figuur 1.3, worden op dit moment in een project van RWS/WVL geherstructureerd. Er wordt in 2017 hard gewerkt aan het dossier macrostabiliteit. Onderdelen van het dossier macrostabiliteit worden bij de herstructurering geactualiseerd en gaan deel uitmaken van nieuwe technische leidraden.

² Het Technisch Rapport Macrostabiliteit is nog in ontwikkeling.



1.2.2 Ontwerpen

Met de leidraden van het WBI2017 is de informatie beschikbaar om een dijk te beoordelen. Voor ontwerpen in het algemeen, maar zeker voor constructies in dijken, is er veel meer nodig.

Voor het ontwerpen van primaire waterkeringen zijn door de Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) en haar opvolger, het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) sinds 1971 Leidraden en Technische Rapporten opgesteld. Deze TAW/ENW-Leidraden en -Technische Rapporten zijn te vinden op de internetpagina <http://www.enwinfo.nl/> onder 'Publicaties' die doorverwijst naar [de Kennisbank waterbouw van de TU Delft](#)).

Een basis voor ontwerpen van dijken staat beschreven in de Leidraad rivieren (TAW, 1989) met aanvullende technische rapporten zoals het TR- waterspanningen (TAW, 2004) en TR- waterkerende grondconstructies (TAW, 2001). Ook de rapporten over faalmechanismen zijn bruikbaar voor het ontwerp.

Voor het ontwerpen en ontwerpuitgangspunten van een groene dijk wordt aanvullend verwezen naar het Ontwerp Instrumentarium (OI2014 en updates daarvan). Het OI is nog in ontwikkeling en dus nog niet volledig. In het project OI2018 wordt dit ontwerp instrumentarium nader ingevuld en komt beschikbaar via de helpdeskwater (www.helpdeskwater.nl). Het ontwerpinstrumentarium is een handreiking die strekt tot aanbevelingen bij het ontwerpen van een kering conform de overstromingskansbenadering.

Binnen de POVM wordt specifiek gewerkt aan stabiliteit verhogende constructies in een dijk. Hiervoor wordt voor een viertal categorieën een ontwerp richtlijn opgesteld te weten: vernagelingstechnieken, drainagesystemen, langsconstructies en grondverbeteringen. Deze richtlijnen worden binnen de POVM opgesteld, voorgelegd aan ENW. De richtlijnen, waaronder deze, komen beschikbaar via de website van de POVM (www.POVM.nl) en via die van de SBR-Curnet (www.sbrcur.net). CUR heeft ook andere publicaties die de ontwerper ondersteunen in het beantwoorden van specifieke ontwerp- en uitvoeringsvraagstukken. Hiervoor wordt verder verwezen naar de genoemde website.

Naast de vier richtlijnen worden binnen de POV-M rapporten opgesteld op deelaspecten, bijvoorbeeld betreffende Eindige Elementen modellen, Veiligheid tijdens de uitvoering, Life-Cycle-Monitoring, Actuele sterkte (Handreiking Faalkans Analyse en Faalkans Updating), parameterbepaling, etc. Deze rapporten zijn beschikbaar via de website van de POVM (www.POVM.nl)

In de voorliggende technische richtlijn zijn de onderwerpen beschreven die bij het ontwerp of bij de beoordeling van waterkeringen waarin drainagemaatregelen zijn opgenomen, moeten worden beschouwd, zodat met een (horizontaal of verticaal) drainagesysteem langs een waterkering op een goede manier wordt bijgedragen aan het behoud van macrostabiliteit en het ondervangen van piping.

1.2.3 Doelgroep

Deze technische richtlijn is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze richtlijn. Tevens wordt verondersteld dat informatie opgenomen in documenten van het WBI 2017 en het OI2014v4, bekend is.

1.3 Waar en wanneer kunnen drainagetechnieken worden toegepast?

Bij hoge buitenwaterstanden neemt de grondwaterdruk (stijghoogte) toe in watervoerende lagen die voorkomen onder waterkeringen, maar ook in het freatische grondwater. Een



toename in grondwaterdruk beïnvloedt de faalmechanismen piping, macrostabiliteit en microstabiliteit³. Een waterkering moet op deze toename berekend zijn. Een drainagesysteem kan de stijghoogte in het watervoerende pakket verlagen en de veiligheidsfactor van de waterkering met betrekking tot de faalmechanismen piping en macrostabiliteit vergroten.

Een drainagesysteem kan goed worden ingezet wanneer een goed waterdoorlatende zandlaag van enige dikte (bijvoorbeeld 5 m of meer) aanwezig is. Bij dunnere zandlagen of bij een heterogene bodemopbouw, is meer aandacht nodig voor ontwerp en realisatie. Het vrijkomende water uit het drainagesysteem wordt veelal geloosd op het binnendijkse watersysteem. Het water moet dan wel tijdens maatgevende omstandigheden op dat systeem geborgen of afgevoerd kunnen worden. Afvoeren van drainagewater is in principe ook mogelijk door de inzet van pompen en het water te spuien op het buitendijks gelegen oppervlaktewater.

Net als elke te treffen maatregel bij dijkversterking, vereist een drainagesysteem beheer en onderhoud. Dergelijk beheer en onderhoud vereisen echter meer aandacht omdat het om een nieuw type maatregel gaat die op een nieuw vakgebied ligt. Gelukkig is een drainagesysteem opgebouwd uit bestaande en bekende technieken. Voorbeelden van toepassing kunnen bijvoorbeeld gevonden worden in de wereld van de drinkwaterwinning, de bemaling en de riolering.

1.4 Belangrijk historisch en recent onderzoek

In het verleden zijn drainagesystemen aangelegd om de stijghoogte of grondwaterstand die bij een hoge waterstand optreedt, te verlagen. Het merendeel van de systemen heeft als primair doel om de stabiliteit van de waterkering te waarborgen en piping te verhinderen. Enkele systemen zijn alleen vanwege wateroverlast gebouwd (Deltares, 2016a). Een overzicht van bestaande drainagesystemen is opgenomen in Figuur 1.4. De figuur is gebaseerd op de handreiking die is opgesteld door (de Groot & Meuwese, 2017), met input vanuit de Klankbordgroep.

³ Het faalmechanisme microstabiliteit wordt kort beschreven in paragraaf 3.2.3 en 3.3.1.

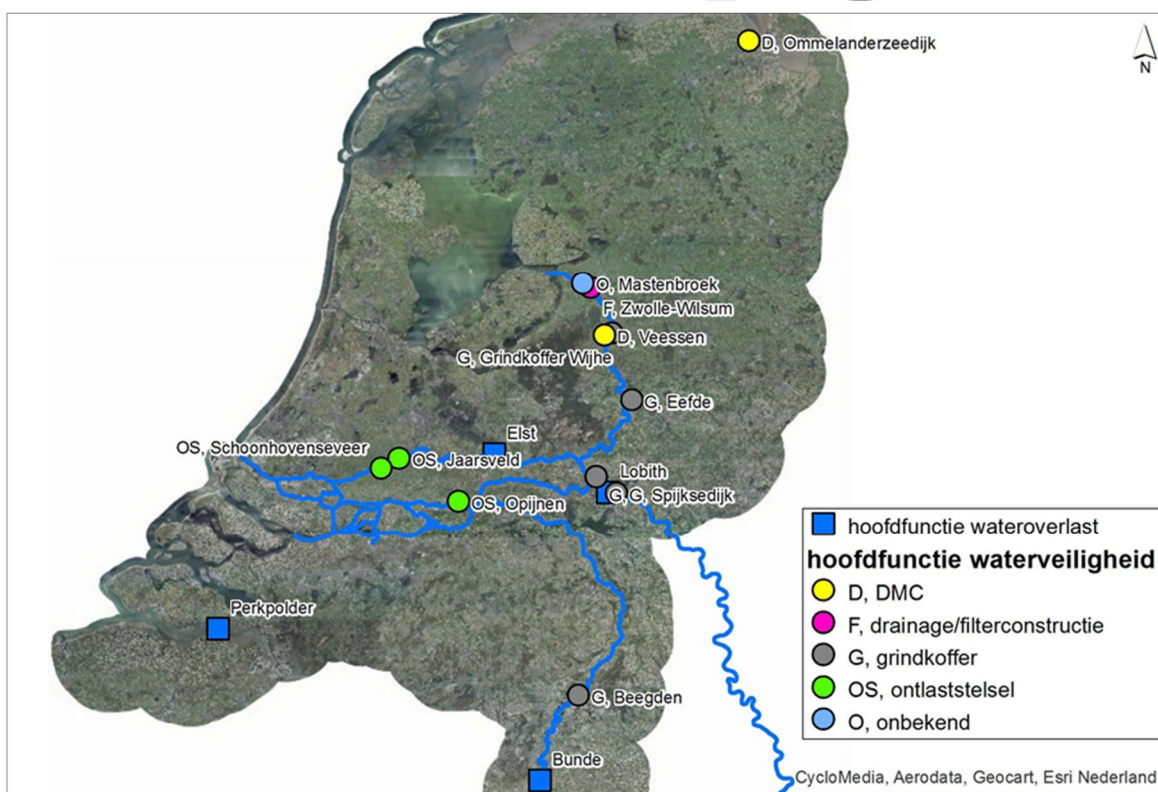


pov

Piping



dijkinnovatie van binnenuit



Figuur 1.4 Overzicht van locatie waar verlagen van de waterspanning is doorgevoerd

1.5 Totstandkoming van TR Drainagetechnieken

De voorliggende technische richtlijn is een initiatief van de POV-Macro stabiliteit. In een vrij vroeg stadium is samenwerking gevonden met de POV-Piping. Vervolgens zijn een Schrijfteam en een Klankbordgroep geformeerd. Het rapport had niet tot stand kunnen komen zonder een goede wisselwerking tussen Schrijfteam en Klankbordgroep.

1.6 TR-macro stabiliteit

Aan de afronding van het Technische Rapport Macro stabiliteit wordt nog gewerkt. De conceptversie is beschikbaar (Zwanenburg, van Duinen, & Rozing, 2013). In dit rapport staat een goede beschrijving van het faalmechanisme macro stabiliteit. Bovendien biedt het rapport een goed overzicht van de rekenmodellen die gebruikt mogen worden en wordt ingegaan op de nieuwe manier van rekenen volgens CSSM (Critical State Soil Model). Ook modellen voor grondgedrag en parameterbepaling worden gegeven.

1.7 OR Zandmeevoerende Wellen en OI

Een goede beschrijving van de fenomenen piping en heave is te vinden in het onderzoeksrapport (OR) Zandmeevoerende Wellen (Förster, van den Ham, Calle, & Kruse, 2012). Bovendien worden rekenmodellen en rekenregels gegeven. Voor de wijze waarop de fenomenen piping en heave moeten worden meegenomen in een ontwerp, waaronder het gebruik van een schematiseringsfactor, wordt verwezen naar het Ontwerp Instrumentarium (versie 4) (Rijkswaterstaat, 2017).

1.8 Leeswijzer

De technische richtlijn (TR) drainagetechnieken is een hulpmiddel om te komen tot een goed functionerend drainagesysteem in het geval van het optreden van een situatie met hoogwater. De TR is bedoeld voor medewerkers van waterschappen en adviesbureaus die te



maken hebben met dergelijke systemen. De TR beoogt geen kookboek te zijn maar de gebruiker wordt geholpen in het nadenken over de verschillende onderdelen en facetten van het systeem. Voor de veiligheidsfilosofie zijn de hoofdlijnen aangegeven en naar mate de ervaring toeneemt, zal een verdere uitwerking worden opgenomen.

Verdieping van de ontwerper is nodig op de verschillende vakgebieden om te komen tot een ontwerp van een drainagesysteem. Te denken valt daarbij aan de combinatie van geotechniek en geohydrologie. Bovendien is kennis van risicoanalyse nodig daar waar in deze richtlijn alleen de hoofdlijnen staan aangegeven.

Deze technische richtlijn is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 bevat een korte presentatie van het principe van drainagetechnieken. De wisselwerking tussen het drainagesysteem en de geotechniek en de geohydrologie wordt aangestipt. Een overzicht van beschikbare technieken is ook te vinden in dit hoofdstuk. Vervolgens wordt kort ingegaan op de kosten van aanleg en op het beheer van een dergelijk systeem.

De veiligheidsbenadering komt aan bod in Hoofdstuk 3. Bij de veiligheidsbenadering wordt uitgegaan van het WBI2017 en OI2014 (versie 4). Het is belangrijk om steeds de laatste versies in beschouwing te nemen. De betrouwbaarheid van een drainagesysteem is een belangrijk onderdeel. Voor het beoordelen of de betrouwbaarheid voldoet, is monitoring essentieel.

Analyseren van het geohydrologische systeem vormt de hoeksteen voor een ontwerp (Hoofdstuk 4). Aandacht wordt besteed aan het samenspel van geohydrologie en grondmechanica, en aan het stappenplan benodigd voor modellering. De opzet en uitwerking van een ondergrondmodel vormt het vertrekpunt van ieder grondwatermodel en verdient dan ook uitgebreide aandacht. Vervolgens komen de onderdelen opzet geohydrologisch model en beschikbare computersoftware aan bod. Het hoofdstuk wordt afgerond met het onderwerp 'van stijghoogten naar waterspanningen in het dijkprofiel'.

Het ontwerpen van een drainagesysteem komt aan bod in Hoofdstuk 5. Begonnen wordt met een algemeen overzicht. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de waterspanning in dijken en achterland. Het hoofdstuk wordt afgesloten met het komen tot een ontwerp.

Na het ontwerp dient het drainagesysteem gerealiseerd te worden. Hoofdstuk 6 gaat in op de realisatie, het testen en het verwijderen van een drainagesysteem. Beheer en onderhoud van de drainage worden behandeld in Hoofdstuk 7.

Bij het realiseren van een drainagesysteem spelen procedures en besluitvorming ook een rol. In Hoofdstuk 8 wordt aandacht besteed aan de verandering van het waterbezwaar na aanleg van een drainagesysteem. Dit waterbezwaar dient verantwoord te worden geloozd. Het hoofdstuk begint met de uitgangspunten om dit verantwoord te doen. Bij een drainagesysteem spelen ook juridische zaken; deze zaken worden dan ook aangestipt.

In Hoofdstuk 9 worden enkele voorbeelden behandeld.

Als bijlagen bij het rapport zijn opgenomen: een symbolenlijst, een begrippenlijst en achtergrondinformatie over ondergrondgegevens.

2 Drainagetechnieken

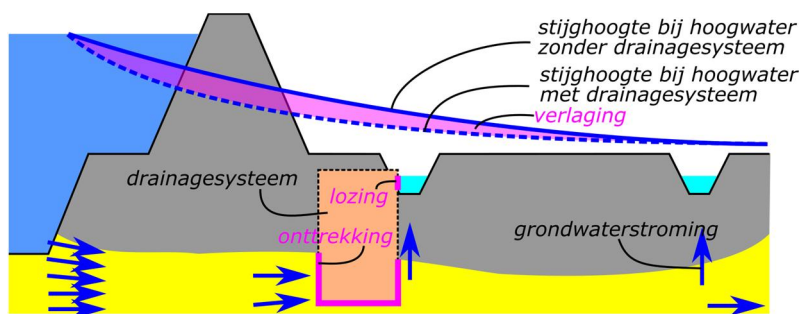
2.1 Algemeen

Het doel van dit hoofdstuk is om een overzicht te geven van drie toegepaste permanente drainagetechnieken bij dijken. Een overzicht van de wisselwerking tussen een drainagesysteem, de geotechniek en een watersysteem staat vermeld in paragraaf 2.2. Per techniek staan de technische basiskenmerken vermeld in paragraaf 2.3. Nadere details per techniek worden behandeld in Hoofdstuk 3.

2.2 Wisselwerking tussen drainagesysteem, geotechniek en watersysteem

Een schematische weergave van een dijk met een willekeurig type drainagesysteem voor een situatie met een hoogwater staat weergegeven in Figuur 2.1. De twee paarse lijnen geven de directe invloed weer tussen het drainagesysteem en de omgeving, namelijk in de volgende compartimenten:

- De grondwaterhuishouding via een onttrekking in de watervoerende laag.
- Het hydrologische systeem via een lozing op het (binnendijkse) oppervlaktewater.



Figuur 2.1 Schematische doorsnede drainagesysteem tijdens hoogwater

Een drainagesysteem kan worden aangebracht in een afgesloten zandlaag en ondiep nabij de binnentoe van de waterkering. Toepassing in een afgesloten zandlaag beïnvloedt de stijghoogte en vermindert de kans op opbarsten en piping. Vanuit het geohydrologische systeem is de toepassing van drainagesystemen vaak kansrijk in afgesloten zandlagen met een beperkt, maar ook niet te laag doorlaatvermogen.

Een drainagesysteem kan zowel bij primaire als regionale keringen worden toegepast. Toepassing ligt het meest voor de hand bij primaire keringen want primaire keringen kennen vaak een wezenlijk peilverschil tussen een gemiddelde waterstand en een hoogwaterstand. Een drainagesysteem kan de invloed van hoogwater op de grondwaterstand aftoppen. Een drainagesysteem zal de veiligheid vergroten bij keringen met een (vrijwel) constant peil.

Drainage kan ook in het freatische grondwater in een waterkering worden aangebracht, maar dan beïnvloedt het systeem alleen de macrostabiliteit. Een dergelijke toepassing kan de grondwateroverlast vanuit het binnentalud verminderen.

De verlaging van de stijghoogte door de installatie van een drainagesysteem in een watervoerende laag onder een waterkering betekent ook dat de (grond)waterhuishouding wijzigt op het moment dat het drainagesysteem water afvoert. Deze verandering kan op gespannen voet staan met het beleid van het waterschap. Relevante processen die tijdens het ontwerp in ieder geval moeten worden beschouwd op dat vlak zijn:



- Door de lagere stijghoogte is een lagere kweldruk aanwezig in het achterland. Dit kan grondwateroverlast tijdens hoogwater beperken of voorkomen. Uit de beoordeling van de regionale waterbalans in paragraaf 4.4.4 volgt dat er netto een toename is het waterbezwaar op het binnendijkse gebied.
- De grondwaterkwaliteit kan wijzigen, bijvoorbeeld doordat verontreinigingen zich anders gaan verplaatsen of door wijzigingen van de chlorideconcentratie.
- De grondwaterstand kan wijzigen waardoor nagegaan moet worden of gevolgschade in de omgeving kan ontstaan, bijvoorbeeld zettingen of gewasschade. Hierbij is ook aandacht nodig voor verlagingen van het grondwater in afgesloten zandlagen die door het drainagesysteem worden ontlast.

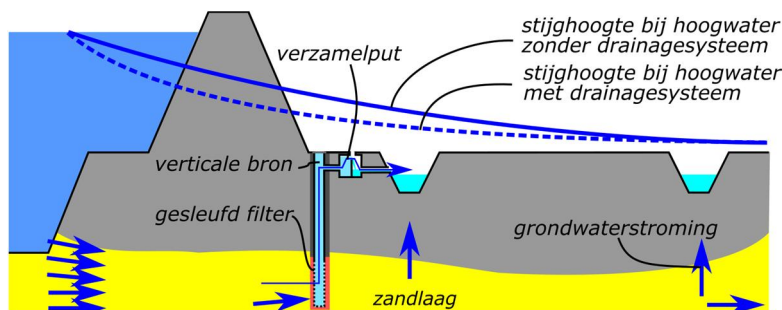
2.3 Overzicht van technieken

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van drie al toegepaste permanente drainagetechnieken bij dijken. De basis daarvoor is overgenomen uit (Arends en Niemeijer, 2014) en (de Groot & Meuwese, 2017). Andere nieuwe drainagetechnieken zijn mogelijk ook geschikt om toe te passen bij dijken, wanneer aandacht is voor de betrouwbaarheid over een lange periode.

2.3.1 Verticale bron

De verticale bron is een toepassing van drainagetechnieken voor een watervoerende laag bij dijken die enkele keren met succes is toegepast. In 1999 is het systeem voor het eerst toegepast in Jaarsveld (beheergebied Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden). Op deze locatie vormen 28 bronnen samen een ontlaststelsel. Een recente toepassing (2016) is een systeem in het project Schoonhovenseveer–Langerak (beheergebied Waterschap Rivierenland).

Onttrekking van grondwater uit een verticale bron is een veel gebruikte methode om de waterdruk in een zandlaag te verlagen. Buiten dijkprojecten wordt de techniek bijvoorbeeld toegepast bij tijdelijke bemalingen en voor de drinkwaterwinning. Een schematisch voorbeeld staat vermeld in Figuur 2.2. De verticale bron wordt geplaatst in een boorgat. Via sleuven in het filter (perforaties in de stijgbuis) staat de bron in verbinding met de zandlaag. Tijdens hoogwater kan water onder vrij verval uit de zandlaag stromen, dit wordt een passief systeem genoemd. Een actief systeem bevat een pomp die grondwater aan het watervoerende pakket onttrekt.



Figuur 2.2 Schematische doorsnede verticale bron en verzamelput tijdens hoogwater

Een gebruikelijke uitwerking van een drainagesysteem met verticale bronnen bestaat uit:

- Een overloopleiding aan de bovenzijde van de stijgbuis waar het grondwater kan uitstromen.



- De bovenzijde van de stijgbuis en de overloopleidingen bevinden zich in een behuizing of putkelder onder maaiveldniveau. De put is voorzien van een afsluitbaar deksel.
- De afvoer- of overloopleidingen van meerdere bronnen zijn verbonden door een verzamelleiding. Via een overlaat in de verzamelleiding kan het afvoerniveau worden bepaald.
- De verzamelleiding lost op het binnendijkse watersysteem.

Het invloedsgebied van een enkele bron wordt bepaald door lokale geohydrologische kenmerken, en de lengte van de bron in relatie tot de dikte van het watervoerende pakket. Voor een drainagesysteem bij dijken zijn altijd meerdere bronnen nodig om over een zekere strekking een significante verlaging te behalen. De ordegrootte van de 'hart-op-hart' afstand bedraagt in de praktijk ongeveer 10 tot 50 m, maar de juiste afstand moet volgen uit de geohydrologische systeemanalyse (Hoofdstuk 4) en het ontwerp (Hoofdstuk 5) waarbij tussen de bronnen de gewenste verlaging als eis wordt aangehouden. Naast een plaatsing bij de binnenteen kan plaatsing ook vereist zijn in het achterland als daar ook een verlaging van de stijghoogte vereist is.

Variant regelbare overlaat

Een variant op het hierboven beschreven principe is dat geen vaste overlaat, maar een regelbare overlaat wordt toegepast. Dit heeft effect op de volgende aspecten:

- De inzet van het drainagesysteem kan worden beperkt tot de periode waarin de toelaatbare stijghoogte wordt overschreden. Dit beperkt de kans op verstopping of het dichtslibben van bronnen, wat positief is voor de betrouwbaarheid tijdens maatgevende omstandigheden. Een systeem met een vaste overlaat zal al enige tijd voor de periode met hoogwater beginnen met afvoeren.
- Het afvoerniveau van het drainagesysteem kan worden bijgesteld als de stijghoogte onvoldoende wordt verlaagd (en de dijkveiligheid in gevaar komt), of te veel wordt verlaagd (en de afvoer onnodig groot is). Afstelling vindt plaats door de verlaging te meten in controlepeilbuizen. Een verlaging van de overlaat kan alleen, wanneer ook na verlaging nog onder vrij verval kan worden afgewaterd.
- Het functioneren van een regelbare overlaat moet worden meegenomen in de faalkansanalyse (Hoofdstuk 3).

Variant pomp

De waterstand in de verticale bronnen kan ook met een (onderwater)pomp worden verlaagd. Dit heeft effect op de volgende aspecten:

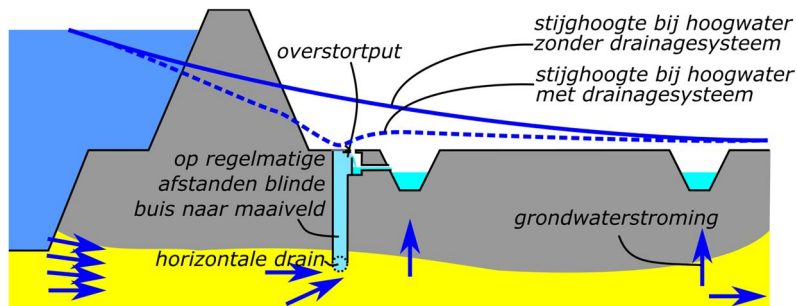
- Bij een gelijk aantal bronnen kan een grotere verlaging worden bereikt dan met afstroming onder vrij verval mogelijk is.
- Bij eenzelfde vereiste stijghoogte kan de 'hart-op-hart afstand' worden vergroot.
- Lozing is niet meer afhankelijk van het waterniveau van het ontvangende water, lozing kan ook op het buitenwater plaatsvinden.
- Wanneer een pomp wordt ingezet, dan moet deze worden meegenomen in de faalkansen. Ook de invloed van het ontvangende water wijzigt in de faalkansanalyse.

2.3.2 Horizontale drain

Een horizontale drain wordt frequent gebruikt als freatische drainage in de binnenteen van een dijk. Dit verbetert de bereikbaarheid en betreedbaarheid van het binnenbeloop en het maaiveld direct aansluitend. Buiten dijkprojecten wordt de techniek bijvoorbeeld toegepast voor de verbetering van de ontwatering van openbaar gebied en landbouwpercelen.

Een horizontale drain kan ook worden gebruikt in een afgesloten watervoerende laag volgens een vergelijkbare methode als de hiervoor beschreven verticale bron; een geperforeerde horizontale buis onttrekt dan het toestromende grondwater. Het verschil zit in de volgende punten:

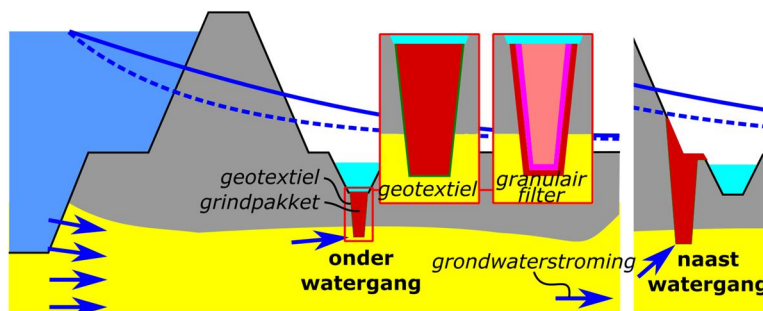
- Het systeem ligt horizontaal, en onttrekt alleen aan de bovenzijde van het watervoerende pakket.
- De afvoer van het onttrokken water loopt in eerste instantie via dezelfde geperforeerde buis, terwijl bij een verticale bron de afvoer door een afzonderlijke verzamelleiding plaatsvindt.
- De hydraulische straal van een horizontale drain kan groter zijn dan van de verticale bronnen samen in een bronsysteem.
- De drain kan worden ingegraven of met een sleufloze boorteknik worden aangelegd, zie Hoofdstuk 6.
- Bij ondiepe ligging is het benodigde debiet om een verlaging van de stijghoogte te realiseren kleiner dan bij een onttrekking met verticale putten; de stijghoogteverdeling nabij de drain is gelijkmatig en bij een puttenreeks is sprake van onttrekkingskegels; bij een drain dragen de beide uiteinden per strekkende meter het meeste bij.



Figuur 2.3 Schematische doorsnede verticale bron en verzamelput tijdens hoogwater

2.3.3 Grindkoffer

De grindkoffer is voor zover bekend het oudste drainagesysteem dat bij waterkeringen is toegepast. Een grindkoffer vormt een verbinding tussen de zandlaag en het oppervlaktewater. De constructie wordt ingebed in de watervoerende zandlaag en watert direct af naar het oppervlak. Een eventuele wateroverspanning in de zandlaag wordt daarmee weggenomen. Dit betekent dat water door het filter kan stromen, maar zanddeeltjes niet. Een schematische doorsnede staat vermeld in Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Schematische doorsnede grindkoffer onder watergang tijdens hoogwater

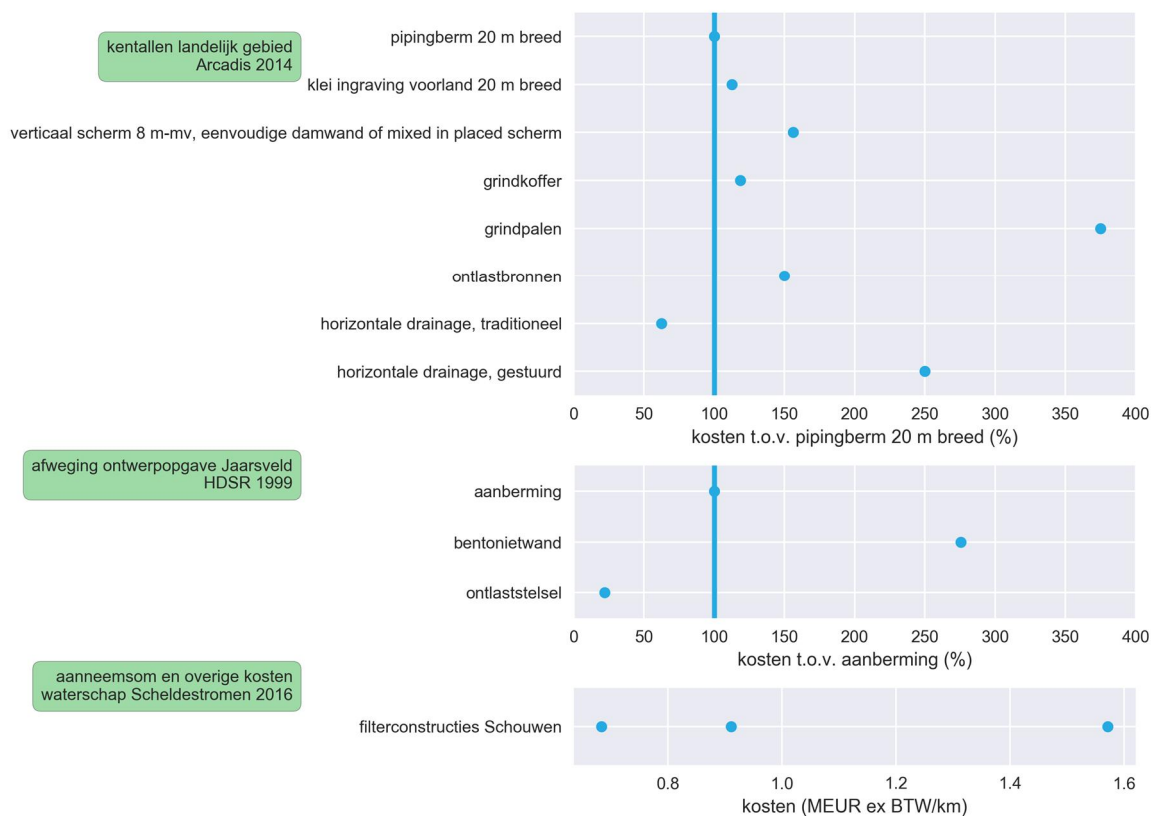


De opbouw van een grindkoffer voorkomt dat zand door het uittredende kwelwater meespoelt, door het toepassen van een geotextiel in combinatie met grind (linker inzet) of door een granulair filter (rechter inzet). Het filter is in beide gevallen grond dicht en daarom kan geen uitspoeling van zand plaatsvinden; piping treedt dan ook niet op. Het principe is vooral geschikt bij een dunne deklaag (enkele meters), omdat dan de aanleg relatief eenvoudig kan worden uitgevoerd.

Een grindkoffer kan eventueel onder een bestaande watergang worden aangebracht. De verlaging van de stijghoogte wordt dan mede bepaald door het peilbeheer in de watergang. Het specifieke waterbezwaar van een grindkoffer kan niet eenvoudig worden waargenomen. Het dient te gebeuren door het aanbrengen van een meetoverlaat of een meetstuw in een watergang. Een alternatief is om de grindkoffer los van het systeem van het oppervlaktewater aan te leggen door een stuw te plaatsen in een gescheiden peilvak. Het peilbeheer kan dan afzonderlijk worden geregeld en de afvoer van de grindkoffer kan dan specifiek worden waargenomen. Als onder vrij verval geloosd wordt, moet in het ontwerp wel rekening worden gehouden met het peilbeheer in het bestaande oppervlaktewater. De grindkoffer in Spijk, een van de voorbeelden uit Hoofdstuk 9, is naast een bestaande watergang aangelegd en daarbij wordt ook de freatische waterstand in de dijk gereguleerd.

2.4 Kosten aanleg en beheer drainagetechniek

De totale kosten (LCC, Life Cycle Costs) van een dijkversterking bestaan uit aanlegkosten, onderhoudskosten en verwijderingskosten.



Figuur 2.5 Vergelijking aanlegkosten (Arends en Niemeijer, 2014); ontwerpogave Jaarsveld en projectervaring Waterschap Scheldestromen



De relatieve aanlegkosten, als percentage van de kosten van een pipingberm, staan weergegeven in de bovenste twee grafieken van Figuur 2.5. In beide grafieken zijn de kosten van een pipingberm op 100% gezet.

- De bovenste grafiek betreft een SSK⁴-raming voor de aanlegkosten (directe bouwkosten) van verschillende dijkversterkingstechnieken in het landelijk gebied (Arends en Niemeijer, 2014). De kosten zijn genomen zonder kosten voor verwerving van de locatie en zonder locatiespecifieke kosten. In deze kostenraming is een via gestuurd boren aangelegd drainagesysteem veelal duurder dan een pipingberm (behalve wellicht als de kosten een traditioneel ingegraven horizontale drainage betreffen).
- De tweede grafiek geeft de afweging weer voor de locatie Jaarsveld (HDSR). Voor deze locatie waren de aanlegkosten van een drainagesysteem lager dan een aanberming vanwege de locatie met historische bebouwing en project specifieke kosten.

De onderste grafiek in Figuur 2.5 bevat een vergelijking van drie filterconstructies die waterschap Scheldestromen heeft aangelegd in 2016. De kosten zijn weergegeven per strekkende kilometer. Circa 75% van de kosten is de aanneemsom, de resterende 25% bevat onderzoek, risico en projectleiding.

Algemene kentallen over beheerskosten zijn niet beschikbaar. Ervaringen in de drinkwaterwereld wijzen uit dat de mate, wijze en de kosten van regeneratie per locatie sterk kunnen variëren.

De beheerskosten van het systeem in Jaarsveld zijn niet in euro's gerapporteerd. De inspanningen voor beheer van dat systeem bestaan uit de volgende onderdelen:

- Continue monitoring via het beheersysteem van het waterschap.
- Een jaarlijkse test bij een hoge waterstand op de rivier.
- De afschrijving bij automatische bediening:
 - Het elektrotechnische gedeelte: 15-20 jaar.
 - Het werktuigbouwkundige gedeelte: 25-30 jaar.
- De levensduur van de PVC-buizen: 50 jaar.
- Het uitvoeren van een camera-inspectie iedere 10 jaar.

Algemene kentallen van de beheerskosten voor het verwijderen van een drainagesysteem zijn niet beschikbaar.

2.4.1 Afwegings- en toepassingscriteria voor iedere techniek

Een afweging tussen de verschillende technieken is relevant voor de verkenning van een dijkversterkingsproject. Een overzicht is te vinden in (Arends en Niemeijer, 2014).

2.4.2 Toepasbaarheid richtlijn

De Technische Richtlijn Drainagetechnieken kan voor alle typen waterkeringen worden gebruikt. Aangezien drainagevoorzieningen zijn gericht op aftoppen van de grondwatereffecten van een hoogwatergolf is dit rapport vooral gericht op primaire waterkeringen.

⁴ Standaard Systematiek voor Kostenramingen



3 Veiligheidsbenadering in relatie tot drainagetechnieken

3.1 Wettelijk kader en normstelling voor beoordelen, ontwerpen, beheren

De normen in de Waterwet zijn afgeleid van het overstromingsrisico dat aanvaardbaar wordt gevonden voor gebieden die bescherming genieten van (primaire) keringen. De normen voor deze gebieden berusten op de volgende twee principes (ENW, 2016):

1. Iedereen moet kunnen rekenen op dezelfde minimale bescherming: het basisbeschermingsniveau, uitgedrukt in Lokaal Individueel Risico (LIR).
2. Waar de gevolgen van overstroming zeer groot zijn, is een kleinere overstromingskans passend, op basis van het groepsrisico en een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA).

In het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) zijn voorschriften opgenomen voor het beoordelen van primaire waterkeringen. De huidige beoordelingsronde loopt van 2017 tot 2023. In de handreiking Ontwerpen met overstromingskansen (OI2014v4) (Rijkswaterstaat, 2017) zijn richtlijnen opgenomen voor het ontwerpen van maatregelen.

Beheerders van primaire waterkeringen moeten, volgens de Waterwet, minstens eens in de twaalf jaar beoordelen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. De manier waarop deze beoordeling moet worden uitgevoerd, is vastgelegd in een wettelijk instrumentarium. In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu actualiseert Rijkswaterstaat dit instrumentarium voor iedere beoordelingsronde. Actualisatie gebeurt op basis van nieuwe kennis, inzichten uit onderzoek en ervaringen met het vorige instrumentarium.

Voor de lopende beoordelingsronde is de actualisatie ingrijpender dan voorheen omdat per 1 januari 2017 een nieuwe veiligheidsnormering is ingevoerd. Deze nieuwe normering gaat uit van een overstromingskansbenadering, waarbij wordt gekeken naar de kans op een overstroming in verhouding tot de toelaatbare overstromingskansen per segment van een (primaire) waterkering. Bovendien zijn nieuwe rekenregels van kracht geworden voor macrostabiliteit (ongedraineerd rekenen) en piping (nieuwe Sellmeijerformule). In 2050 moeten alle primaire waterkeringen aan de nieuwe veiligheidsnormen voldoen. Het instrumentarium voor de komende beoordelingsronde, het WBI 2017, is volledig gebaseerd op de nieuwe normering (bron www.helpdeskwater.nl).

3.2 Veiligheidsbenadering uitgaande van het WBI-2017 en OI2014

3.2.1 Ontwerpen of beoordelen

Onzekerheden worden binnen OI en WBI waar mogelijk afgedekt door het hanteren van rekenwaarden. Wanneer dit niet lukt, bijvoorbeeld bij schematiseringsonzekerheden, worden scenario's gedefinieerd om deze onzekerheden af te dekken.

Binnen het WBI worden de onzekerheden in de schematisering afgedekt door mogelijke scenario's te hanteren, die gecombineerd worden verwerkt in een eindoordeel. Bij het ontwerpen van een waterkering waarin een drainagemaatregel is opgenomen, wordt volgens OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017) gewerkt, waarbij de onzekerheden in de schematisering worden afgedekt door uit te gaan van de schematiseringsfactor.



Het verschil tussen beoordelen en toetsen zit voornamelijk in het zichtjaar waarnaar wordt gekeken. Deze datum is doorgaans verder in de toekomst bij een ontwerp dan bij een beoordeling. Er moet worden aangetoond dat aan de veiligheid wordt voldaan in het zichtjaar. Naast de hogere toekomstige waterstanden moet ook rekening worden gehouden met degradatie van de dijk en de drainageconstructie tot en met het zichtjaar. Vanzelfsprekend wordt daarbij rekening gehouden met beheer en onderhoud. Er kan ook gekozen worden om een drainageconstructie, of onderdelen daarvan, voor een kortere levensduur te ontwerpen dan het zichtjaar voor de dijkversterking. In dat geval moet rekening gehouden worden met vervangen van (onderdelen van) het systeem.

3.2.2 Faalmechanisme macro-instabiliteit en drainage

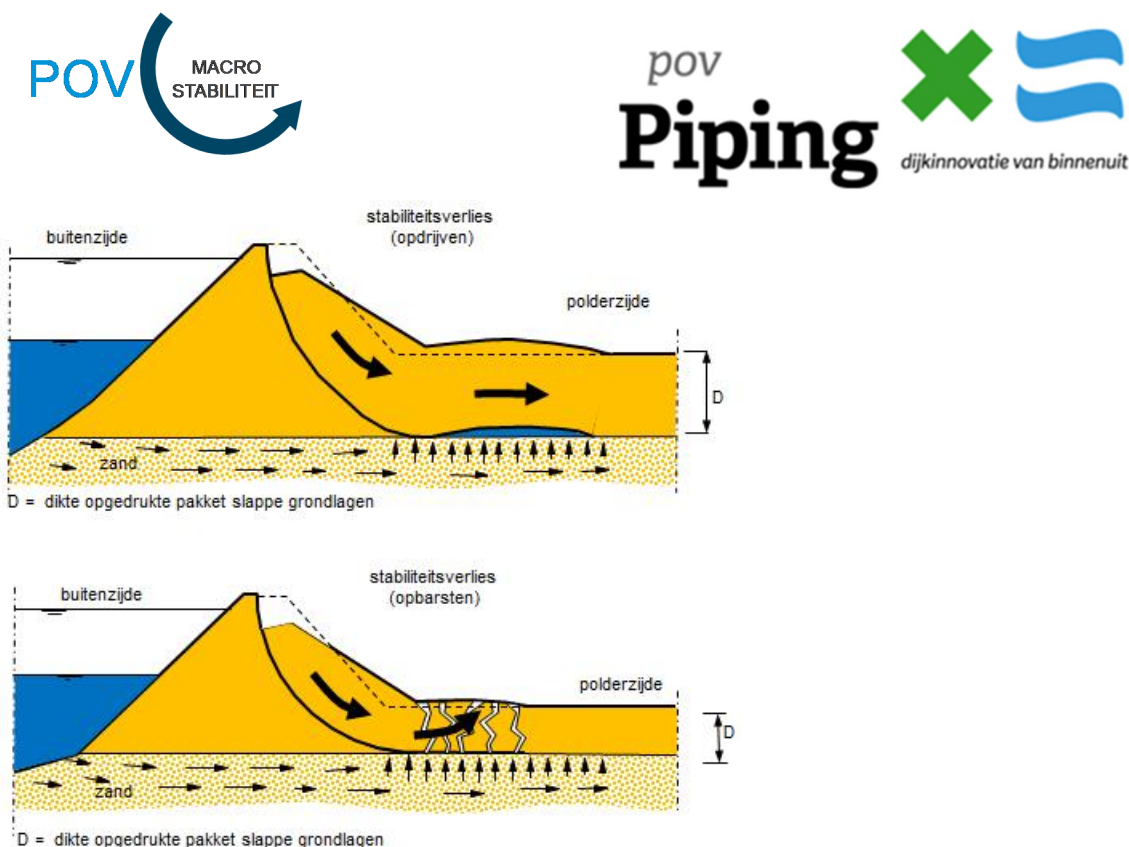
De spanning in de ondergrond is verdeeld in de effectieve spanning tussen de gronddeeltjes onderling en de grondwaterdruk of grondwaterspanning. Bij een gelijkblijvend maaiveldniveau en bodemopbouw neemt de effectieve spanning af bij een oplopende grondwaterdruk. Een afname van effectieve spanning vermindert de weerstand tegen afschuiven. Bij een oplopende grondwaterstand zal de veiligheid tegen afschuiven daarom afnemen. Omgekeerd zal een vermindering van de waterspanning, door bijvoorbeeld drainage, de stabiliteit van de kering bevorderen.

Het faalmechanisme Macro-instabiliteit Binnenwaarts (STBI) houdt in dat als gevolg van de overschrijding van de sterkte van de grond door de belasting, een glijvlak kan ontstaan aan de landzijde van de dijk. De grond boven het glijvlak aan de landzijde van de dijk schuift dan af over dit glijvlak. Ten gevolge van de afschuiving wordt het dijkprofiel verzwakt en kan bij hoogwater een dijkdoorbraak met inundatie van het achterland optreden. De achtergrondkennis is beschreven in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies TRWG (TAW, 2001) en het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken TRW (ENW, 2004).

Bij bezwijken kan sprake zijn van macro-instabiliteit (glijvlak door de dijk) of macro-instabiliteit met opdrijven.

Bij het bezwijken langs een glijvlak (macro-instabiliteit) zijn de effectieve spanningen ter plekke te laag om voldoende sterkte tegen afschuiven van de grond te leveren. De (te) lage effectieve grondspanningen waardoor bezwijken optreedt, kunnen worden veroorzaakt door een (te) geringe belasting vanuit eigen gewicht van de grond in combinatie met een (te) hoge grondwaterspanning en grondeigenschappen die te zwak zijn om macro-instabiliteit te weerstaan.

Bij macro-instabiliteit met opdrijven ontstaat een glijvlak door de dijk en door het achterland na opdrijven in het achterland van de waterremmende toplaag (Figuur 3.1). Bij opdrijven van een waterremmende (slecht doorlatende) grondlaag aan de binnenzijde van een waterkering is het eigen gewicht van die grondlaag geringer dan de opwaartse waterdruk vanuit de watervoerende laag aan de onderzijde van de waterremmende laag. Het opdrijven van de waterremmende grondlaag kan leiden tot instabiliteit van de grond op de waterkering wanneer de stempelwerking van de binnendijkse grondlaag te klein wordt of geheel wegvalt.



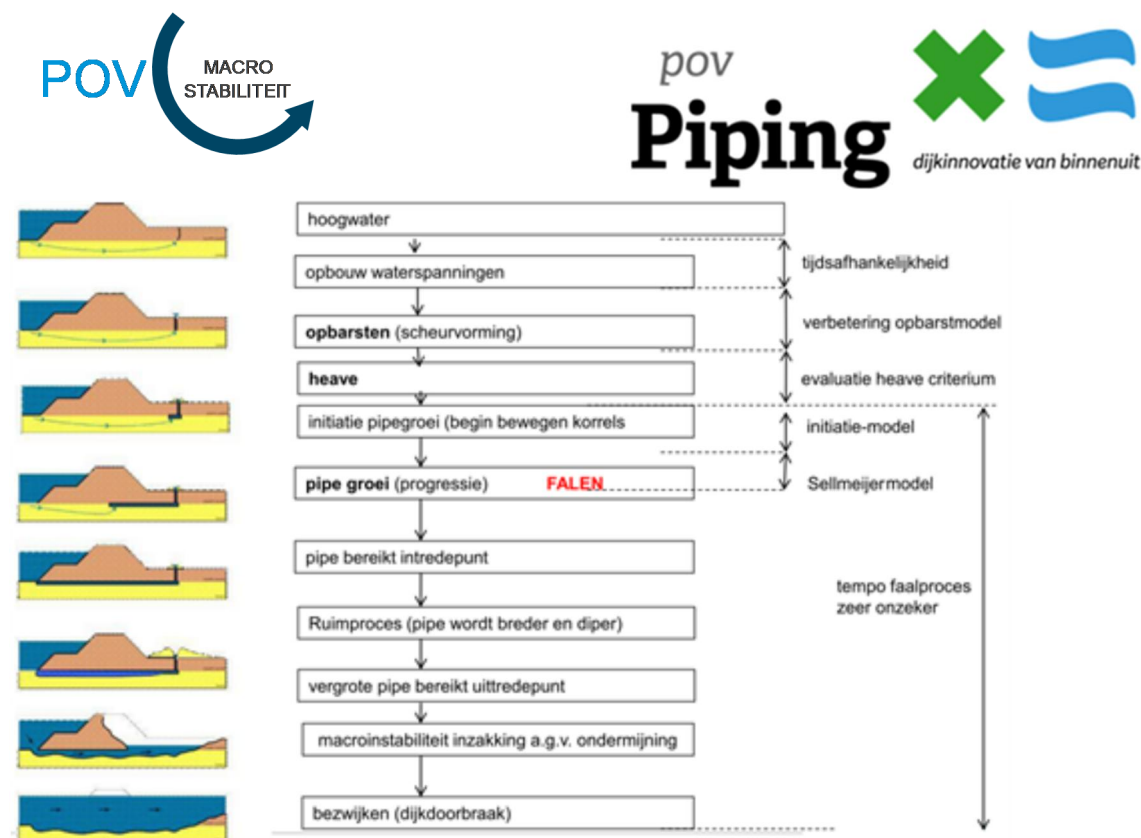
Figuur 3.1 Afschuiven als gevolg van opdriven en opbarsten in het achterland. (Wiki Noodmaatregelen Waterkeringen, Deltares)

Het doel van een geohydrologische maatregel is om de grondwaterspanning onder de waterkering op een veilig niveau te houden. Tijdens het optreden van een extreem hoogwater aan de buitenzijde wordt de stijgende grondwaterstand onder de waterkering door de werking van het drainagesysteem verlaagd. Een geohydrologische drainagemaatregel wordt aangebracht in de watervoerende laag waar de waterdruk onder de waterkering ontstaat die aanleiding kan geven tot verlies van stabiliteit. De situering van de maatregel moet wel worden afgestemd op de ligging van het glijvlak.

3.2.3 Faalmechanisme piping en drainage

Piping is het verschijnsel dat onder een waterkering (dijk of kunstwerk) een holle pijpvormige ruimte ontstaat, ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd; dit verschijnsel wordt ook onderloopsheid genoemd. In de feitelijke definitie is sprake van piping indien zich een doorgaand open kanaal heeft gevormd van intreepunt tot uitreepunt, en het erosieproces van een zandmeevoerende wel doorgaat (Sellmeijer, 1988). Een dergelijk gat of scheur kan ontstaan door een ander mechanisme zoals "opbarsten" (Figuur 3.1).

Wanneer het uitredend grondwater zandkorrels meevoert, ontstaat een "zandmeevoerende wel". Als de stroomsnelheid groot genoeg is om zandkorrels mee te voeren met de stroming kan een erosiepijp groeien onder waterremmende toplagen. Als deze pijp groeit tot aan de voedende zijde (de rivier), kan een situatie ontstaan dat de stroming zodanig toeneemt dat het gat zich door erosie verbreedt en inzakt. Daarna kan een bres optreden en de waterkering bezwijken. De ontwikkeling van het bezwijkproces is geschetst in Figuur 3.2.



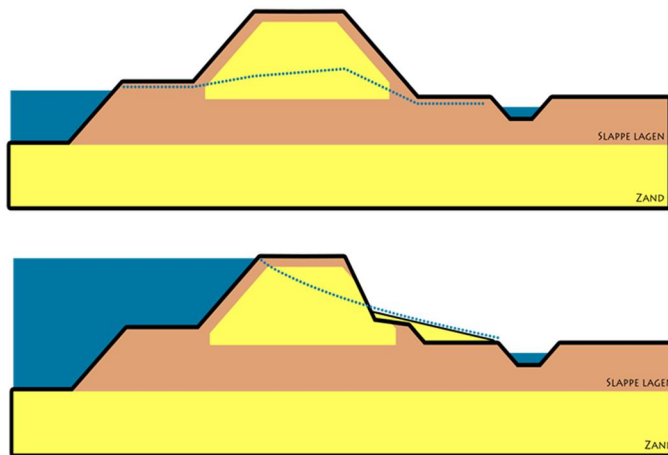
Figuur 3.2 Bezwijken als gevolg van piping; het pipingproces in stripvorm (Deltares, 2013b)

Een drainagesysteem verlaagt de stijghoogte, waarmee tevens de opwaartse waterdruk onder de waterremmende toplaag wordt verminderd zodat opbarsten wordt voorkomen, en daarmee het faalproces wordt onderbroken. Voor het bepalen van de veiligheid tegen opbarsten zijn in het OI2014v4 partiële veiligheidsfactoren gegeven (Rijkswaterstaat, 2017). Deze factoren leggen een relatie tussen de opbarstfactor en de faalkans en kunnen als invoer gebruikt worden in een semi-probabilistische berekening. Behalve dat opbarsten van de toplaag wordt voorkomen, is het ook mogelijk om met een drainagesysteem het verval over de deklaag zodanig te verlagen, dat heave wordt voorkomen. In verband met een criterium voor heave zijn in het OI2014v4 de veilig geachte heave-gradiënten gegeven.

In de toekomst is het wellicht mogelijk om verlaging van de stijghoogte door een drainagesysteem in de berekening van de groei van de pipe te verdisconteren. Daarvoor is een numeriek model nodig, waarin het erosieproces is gemodelleerd. Een voorbeeld daarvan is het computerprogramma DG-Flow dat momenteel wordt ontwikkeld en waarin het numerieke model van Sellmeijer voor het berekenen van de terugschrijdende erosie is verwerkt.

3.2.4 Faalmechanisme micro-instabiliteit en drainage

Een derde mechanisme, naast piping en macro-instabiliteit, dat met een drainageconstructie kan worden beïnvloed, betreft micro-instabiliteit. Micro-instabiliteit is een verzamelterm voor het optreden van oppervlakkige afschuivingen en uitspoeling van grond uit het dijklichaam onder invloed van de grondwaterstroming door het dijklichaam. Door de stroming van grondwater ontstaat verweking, wordt de bekleding opgedrukt en ontstaan scheuren en verzakkingen. De zandkern komt dan bloot te liggen en het zand spoelt uit (Figuur 3.3). Een drainage in het dijklichaam verlaagt de ligging van de freatische lijn waardoor de kans op micro-instabiliteit vermindert. Een lagere freatische lijn is ook gunstig voor de macrostabiliteit. In het eerste voorbeeld van Hoofdstuk 9 komt dat dan ook ter sprake.



Figuur 3.3 Bezwijken als gevolg van micro-instabiliteit aan de binnenzijde van een dijk

3.2.5 Belastingen

De belangrijkste externe belastingen op een waterkering zijn doorgaans de waterdruk, de krachten die de golven op de waterkering uitoefenen en de stroming langs, door of onder de kering (ENW, 2016). Bovendien kan een waterkering worden belast door bijvoorbeeld het verkeer, als er een weg op ligt. In het document over de werkwijze voor de bepaling van hydraulische ontwerprandvoorwaarden (Deltares, 2015) is per watersysteem aangegeven hoe de ontwerpbelastingen of hydraulische ontwerprandvoorwaarden dienen te worden bepaald. De helpdesk water (www.helpdeskwater.nl) kan daarvoor worden geraadpleegd. Hydra-modellen zijn beschikbaar voor het uitvoeren van de berekeningen. Ieder Hydra-model is locatie-specifiek en maakt gebruik van databases waarin gebiedsinformatie is opgenomen.

De databases bevatten informatie over de waterstanden aan de buitenteen van de dijk. De afleiding van de maatgevende belasting verschilt voor verschillende belastingtypen en verschillende watersystemen. In het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017) staan de vijf stappen beschreven voor de verwerking. Bij de verwerking wordt onder andere rekening gehouden met effecten van klimaatverandering en met aanwezige onzekerheid waarbij de onzekerheidstoeslag afhankelijk is van het betreffende watersysteem.

De gevoeligheid van een ontwerp voor de onzekerheid in de uitgangspunten moet worden nagegaan door een beschouwing van marges in de uitgangspunten of de tijdhorizon (einde levensduur). De maatgevende waterstand is voor alle faalmechanismen de waterstand met een kans die gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskansen voor het betreffende normtraject.

3.2.6 Opzet van de faalkansanalyse

In de gewijzigde Waterwet is de overstromingskansbenadering geïntroduceerd als de nieuwe aanpak voor ontwerpen en beheren van waterkeringen. Normspecificaties worden toegepast per dijktraject met een normklasse voor de overstromingskansen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a). In de grondslagen voor hoogwaterbescherming (ENW, 2016) wordt een uiteenzetting gegeven van de nieuwe normen. Bovendien worden de aspecten beoordelen, ontwerpen en beheren behandeld.

De grenswaarden, de maximaal toelaatbare overstromingskansen en de signaleringswaarden zijn vermeld in de Waterwet. De maximaal toelaatbare overstromingskansen is gelijk voor het ontwerpen en beoordelen, maar het verschil zit in de te gebruiken hydraulische belasting en het aanhouden van de signaleringswaarde bij de beoordeling. Voor het ontwerpen moet



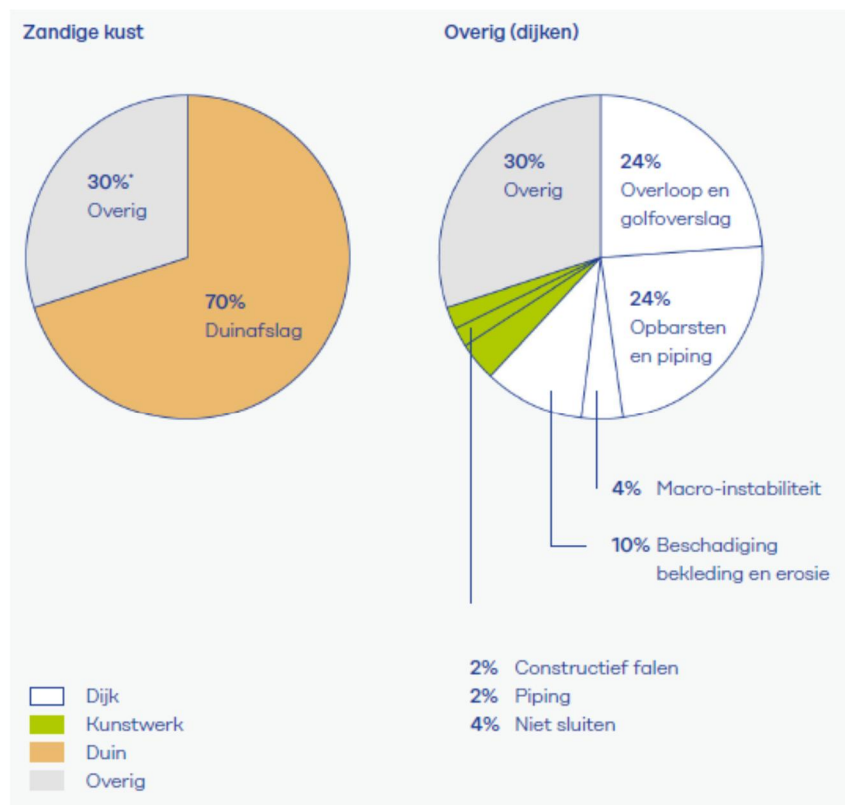
namelijk rekening worden gehouden met effecten van klimaatverandering en van bodemdaling (Rijkswaterstaat, 2017).

3.2.6.1 Standaard faalkansbegroting dijkenprofiel bij ontwerpen

Bij de opzet van een ontwerp wordt uitgegaan van het feit dat een waterkering via diverse mechanismen tot falen kan komen. Binnen een faalkansbegroting wordt een overstromingskansnorm verdeeld over de verschillende faalmechanismen. Daarbij wordt geen rekening gehouden met correlaties tussen de verschillende mechanismen. Een faalkansbegroting is nodig voor het uitvoeren van (semi) probabilistische ontwerpanalyses.

De begroting wordt gebruikt voor het stellen van een faalkanseis per mechanisme. De standaard faalkansbegroting uit het WBI voor dijken en de begroting die is opgenomen in het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017) staat vermeld in Figuur 3.4.

De standaard faalkansbegroting wordt gebruikt in de verkenningsfase voor het bepalen van de versterkingsopgave. Binnen de faalkansbegroting is meestal 70% van de ruimte gereserveerd voor de bekende faalmechanismen zoals macro-instabiliteit, opbarsten en piping, bekleding, overloop en overslag, en falen van kunstwerken. Voor de overige mechanismen is 30% gereserveerd (Figuur 3.4). Afwijken van deze standaardbegroting is mogelijk, zolang het totaal maar 100% blijft (ENW, 2016).



Figuur 3.4 De standaard faalkansbegroting als percentages van de maximaal toelaatbare overstromingskans (ENW, 2016)



3.2.6.2 *Benadering voor het beoordelen van macro-instabiliteit*

In principe zijn er 3 methoden beschikbaar om de kans op macro-instabiliteit van een waterkering te onderzoeken:

1. Volledig probabilistische analyse van macro-instabiliteit op basis van een kansverdeling voor de onzekerheid in de belastingen, de geometrie, de bodemopbouw en de grondeigenschappen, waarbij de gestelde topeis wordt aangetoond. Deze methode is echter dermate complex dat deze nog niet bruikbaar is voor toepassing in de praktijk.
2. Onderzoek van de macro-instabiliteit volgens semi-probabilistische rekenvoorschriften waarbij partiële veiligheidsfactoren worden omgewerkt naar betrouwbaarheidsindexen. De betrouwbaarheidsindexen kunnen vervolgens worden gelinkt aan faalkansen voor de faalmechanismen. Via decompositie van het systeem worden faalkansbegrotingen opgesteld die aangeven welke eisen aan elementen worden gesteld. De faalmechanismen worden in een foutenboom geplaatst. Deze methode is niet gangbaar voor toepassing in de praktijk.
3. Onderzoek van de macro-instabiliteit volgens semi-probabilistische rekenvoorschriften waarbij voor de maximaal toelaatbare kans op falen van de maatregel de bijdragen van onzekerheden via partiële veiligheidsfactoren worden nagegaan aan de hand van de schematiseringsfactor. Deze methode vindt op dit moment volop toepassing in de praktijk volgens de beschrijving die is gegeven in de Technische Richtlijn Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken (ENW, 2012) en het bijbehorende achtergrondrapport. De praktische toepassing is beschreven in het Stappenplan Schematiseringsfactor (Arcadis, 2010). Ook hierbij worden partiële veiligheidsfactoren gelinkt aan faalkansen bij gebeurtenissen die in een foutenboom zijn ondergebracht. De nieuwe veiligheidsfactoren en de kalibratieformules zijn te vinden in OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017).

De veiligheidsbenadering die in voorliggend rapport is beschreven, gaat uit van een semi-probabilistische benadering volgens de derde methode.

3.2.6.3 *Benadering voor het beoordelen van piping*

Met de huidige rekenregels is het niet mogelijk om door middel van drainage de beoordeling van piping direct te beïnvloeden. De analytische formulering van de rekenregel van Sellmeijer geeft daar geen mogelijkheden toe. Wel is het mogelijk om met drainage de grondwaterdruk te verlagen onder een waterremmende toplaag. De faalmechanismen die piping inleiden, namelijk opbarsten of heave, worden dan beïnvloed en via die weg is een ontwerp op te stellen dat voldoet aan de faalkanseis met betrekking tot het mechanisme piping.

Verder kunnen voor piping dezelfde 3 methoden worden geformuleerd als in de vorige paragraaf voor macrostabiliteit is gedaan. Voor de partiële veiligheidsfactoren en kalibratieformules wordt verwezen naar het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017).

3.2.6.4 *Partiële veiligheidsfactoren macrostabiliteit en piping*

Een aantal partiële veiligheidsfactoren is van toepassing bij een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse. Om aan te geven waar de veiligheid is verwerkt met betrekking tot de grondwaterstijghoogte of waterspanning, is hierna het overzicht met de verschillende factoren vermeld die in een analyse moeten worden toegepast:



Macrostabiliteit

- γ_n de partiële factor die verband houdt met de normhoogte, het al dan niet falen door hoogwater en het lengte-effect (schadefactor). De schadefactor is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- γ_d de partiële factor voor de modelonzekerheid (modelfactor).
- γ_m de partiële factoren voor de onzekerheid betreffende de schuifsterkteparameters (materiaalfactor).
- γ_b de partiële factor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen (schematiseringfactor).

Opbarsten

- $\gamma_{u,m}$ de veiligheidsfactor voor opbarsten in relatie tot macrostabiliteit. Deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- $\gamma_{u,p}$ de veiligheidsfactor voor opbarsten in relatie tot piping. Deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- $\gamma_{b-u,p}$ de partiële veiligheidsfactor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het mechanisme opbarsten in relatie tot piping (de schematiseringsfactor).

Heave

- γ_{he} de veiligheidsfactor voor heave; deze factor is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- γ_{b-h} de partiële veiligheidsfactor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het mechanisme heave (de schematiseringsfactor).

Piping

- γ_{pip} de veiligheidsfactor voor piping; deze factor is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis.
- $\gamma_{b,p}$ de partiële veiligheidsfactor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het mechanisme piping (de schematiseringsfactor).

Een overzicht van de partiële veiligheidsfactoren is te vinden in het ontwerpinstrumentarium (Rijkswaterstaat, 2017). De achtergrond van deze factoren is te vinden in (Rijkswaterstaat, 2016).

3.3 Betrouwbaarheid van drainagetechnieken

3.3.1 Afdekken van onzekerheden

Naast de gangbare geotechnische en geohydrologische onzekerheden brengen drainagetechnieken ook aanvullende onzekerheden met zich mee. Deze dienen voldoende te worden afgedekt. Er kan onderscheid worden gemaakt in de volgende onzekerheden die samenhangen met de introductie van drainage in of nabij de dijk:

- 1) Onzekerheid over de gerealiseerde reductie van de waterspanningen.
De gerealiseerde waterspanningsreductie kent onzekerheid, onder meer door onbekendheid omtrent het precieze functioneren van de drainageconstructie. De waterspanningsreductie kan worden gemodelleerd door middel van continue kansverdelingen. De onzekerheid kan worden afgedekt in een semi-probabilistische som



door de rekenwaarde van grondsterkte te bepalen op basis van metingen. De verdeling kan ook direct worden toegepast in een probabilistische analyse. In dit TR wordt de variabiliteit afgedekt door te rekenen met karakteristieke waarden van de waterspanningen, die een overschrijdingskans hebben van 5%. Het afleiden van deze rekenwaarde wordt verder behandeld in Hoofdstuk 5.

- 2) Discrete onzekerheid over het functioneren van de drainage.
 Naast de hierboven beschreven variabiliteit is er ook een onzekerheid of de drainage wel functioneert (dus of de rekenwaarden wel wordt gehaald). Dit kan bijvoorbeeld zijn door uitvoeringsfouten of door degradatie van het drainagesysteem. Deze (doorgaans discrete) onzekerheden kunnen in overeenstemming met de TR Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012) worden afgedekt door te rekenen met scenario's. Het afdekken van deze discrete scenario's kan direct via de scenariokansen of via een schematiseringsfactor worden gedaan. Dit wordt in de volgende paragrafen uitgewerkt.

De bovengenoemde opsplitsing is enigszins arbitrair aangezien functioneren niet eenduidig gedefinieerd kan worden. Als een drainage deels verstopt is, functioneert deze nog wel ten dele. Dit kan worden meegenomen in 1) als lagere rekenwaarde of in 2) als een apart scenario. Invulling hiervan wordt aan de gebruiker overgelaten.

Opgemerkt wordt dat een dijk met een drainageconstructie niet minder betrouwbaarheid hoeft te zijn dan een dijk zonder drainageconstructie. In beide gevallen is een geohydrologische schematisering nodig, die onzekerheden kent. In het geval een drainageconstructie wordt ontworpen, dan wordt nagenoeg altijd ook monitoring voorgeschreven. De correcte werking kan daarom worden gevolgd, hetgeen bij klassieke maatregelen niet het geval is, tenzij ook daar gemonitord wordt.

3.3.2 Foutenboom

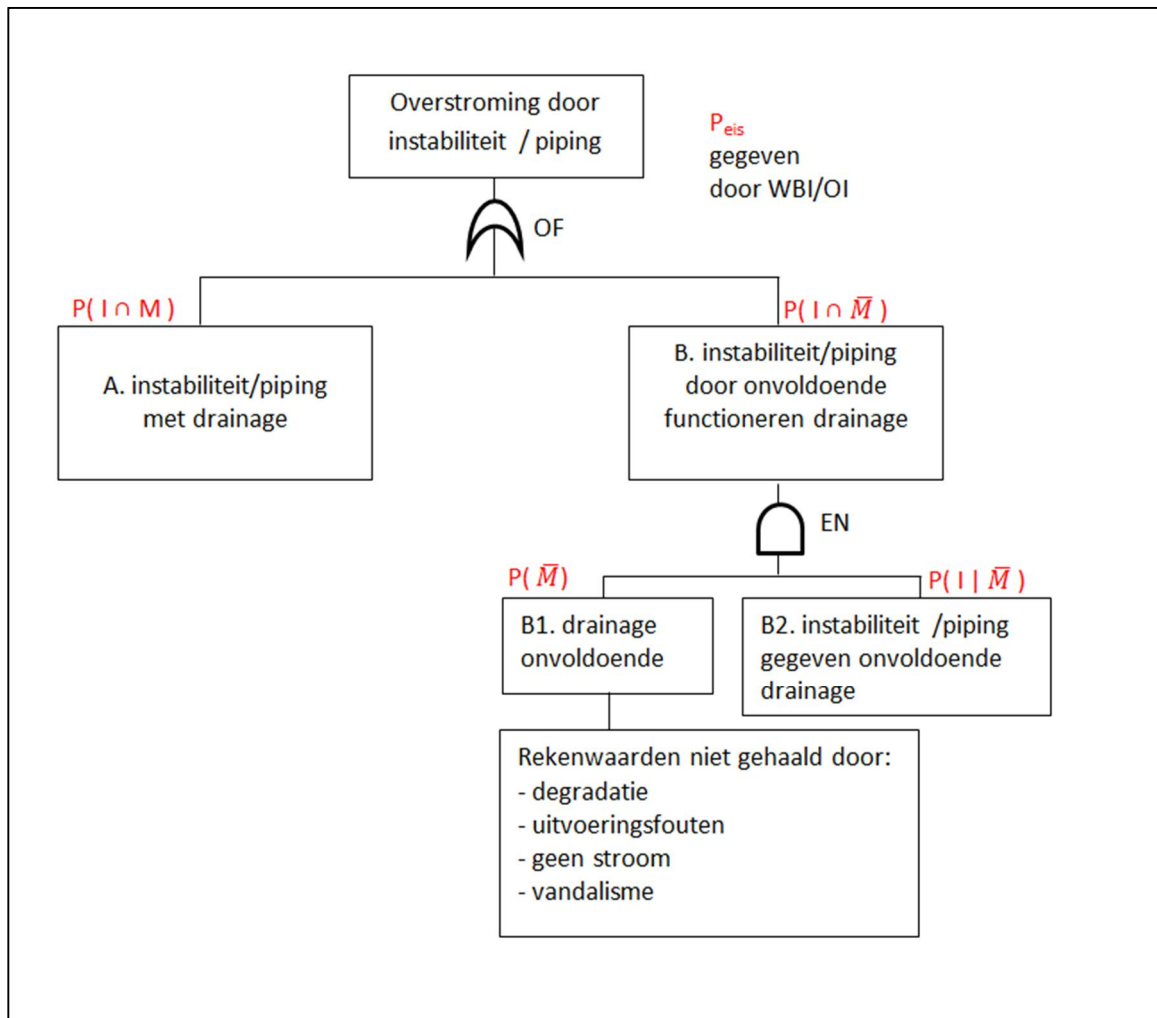
Om aan te tonen dat de kering die met een drainage constructie is verbeterd, voldoet aan de eis, wordt het systeem geanalyseerd met een foutenboom. In Figuur 3.5 is deze foutenboom voor een overstroming door instabiliteit weergegeven in geval een drainageconstructie aanwezig is.

Falen door macrostabiliteitsverlies kan optreden als de drainage functioneert zoals voorzien (A) of als de drainage niet voldoende functioneert (B). Het doel is om aan te tonen wat de gecombineerde kans van falen is bij functioneren van de drainage $P(I \cap M)$ en of deze bij niet voldoende functioneren van de drainage $P(I \cap \bar{M})$ voldoet aan de doelbetrouwbaarheid. De volgende elementen zijn van belang in de foutenboom:

- A: instabiliteit gegeven aanwezigheid van drainage (rekenwaarden worden gehaald).
- B1: kans op onvoldoende functionerende drainage (rekenwaarden worden niet gehaald).
- B2: instabiliteit gegeven dat de drainage niet aan de rekenwaarden voldoet.

A en B2 dienen te worden aangetoond door middel van analyse naar stabiliteit of piping. B1 dient te worden aangetoond met een analyse van het drainagesysteem. Omdat alle componenten bijdragen aan de faalkans, ontstaat er een systeem van "communicerende vaten". Een lage kans bij één aspect (bijv. B1) kan resulteren in een minder strenge eis bij de andere componenten (bijv. A). Dit betekent dat een flexibel format kan worden aangehouden om aan te tonen dat aan de eis wordt voldaan. Aantonen dat aan de faalkanseis wordt voldaan kan zowel via een volledig probabilistische methode of via een meer gangbare semi-

probabilistische benadering op basis van berekende stabiliteitsfactoren. In het laatste geval kan het voldoende zijn om twee stabiliteitsommen (met werkende drainage en met onvoldoende functionerende drainage) en een inschatting van de kans op falen van de maatregel te maken. In geval er geen aanvullende scenario's zijn (of indien de kans hierop verwaarloosbaar klein is), kan worden volstaan met één som (A).



Figuur 3.5 Foutenboom voor de veiligheidsfilosofie bij drainageconstructies, met in rood de kansbijdrages aan het totaal.

3.3.3 Aantonen van betrouwbaarheid van een dijk met drainageconstructies

Het aantonen dat aan de betrouwbaarheid wordt voldaan, kan op verschillende manieren worden gedaan:

Onderscheid kan worden gemaakt in:

- 1) Topeis direct aantonen via probabilistische analyses.
Hierbij is het nodig om een inschatting van de faalkans te maken van A, B1 en B2.
- 2) Topeis indirect aantonen via semi-probabilistische analyses.
Hierbij worden de veiligheidsfactoren met drainage (A) en zonder functionerende drainage (B1) via gekalibreerde relaties omgerekend naar een faalkans. In combinatie



met de kans op falen van de drainage (B2) kan worden aangetoond of aan de topeis wordt voldaan.

3) Schematiseringsfactor toepassen.

Onzekerheden in het functioneren van de drainage worden hierbij afgedekt door een extra marge in de vereiste veiligheidsfactor (de zogenaamde schematiseringsfactor). De grootte van deze factor hangt af van het veiligheidstekort zonder drainage (A en B1) en de kans op falen van de drainage (B1). Er is dus dezelfde informatie nodig als bij optie b).

Optie a): een volledige probabilistische analyse is momenteel niet gebruikelijk, maar zal in de toekomst steeds vaker worden ingezet.

Bij de opties b) en c) wordt opgemerkt dat er diverse combinatie van B1 en B2 kunnen optreden, variërend van een volledig falende drainage tot een drainagesysteem dat op slechts een klein onderdeel faalt. Daarbij horen corresponderende stijghoogten. De combinatie van een faalmodus met de corresponderende stijghoogte is één scenario.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de huidige versie OI2014_v4 voorziet in optie c), terwijl dit WBI gebruik maakt van optie b). In de volgende hoofdstukken is voornamelijk optie c) verder uitgewerkt. Opgemerkt wordt dat de opties b) en c) in wezen gelijk zijn. Bij optie c) wordt echter een tussenstap gemaakt via de schematiseringsfactor. Dit maakt het voor de gebruiker die gewend is met partiële veiligheidsfactoren te werken meer inzichtelijk.

3.3.4 Aantonen van betrouwbaarheid van de drainagetechnieken

De bepaling van kans op instabiliteit of piping met (A) en zonder (B1) drainage is redelijk gangbaar. De grootste uitdaging zit in het aantonen van de betrouwbaarheid van de drainageconstructie (B2). Dit hangt af van de toegepaste drainagetechniek. Een paar handvatten hiervoor zijn:

- Ontwerpen volgens Eurocode: afhankelijk van de gebruikte 'consequence class' kan een bepaalde betrouwbaarheid worden aangetoond.
- Monitoring: op basis van monitoring kan worden bepaald in hoeverre de drainage functioneert.
- Certificaten: voor sommige materialen en elementen kunnen deze worden gebruikt om binnen de levensduur een bepaalde betrouwbaarheid aan te tonen.
- Experimenten: deze kunnen helpen functioneren aan te tonen.

Een aandachtspunt is wel dat de faalkanseis een kans per jaar is. Terwijl van elementen soms alleen een faalkans per vraag kan worden aangetoond. Hier dient goed mee omgegaan te worden.

3.4 Betrouwbaarheid van drainagetechnieken

3.4.1 Algemeen

De toepassing van drainagetechnieken is gericht op het verlagen van de waterspanning in de ondergrond, specifiek voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit, zodat de veiligheidsfactoren ten aanzien van deze faalmechanismen worden verhoogd. Drainagetechnieken kunnen ook toegepast worden om de veiligheidsfactor op andere faalmechanismen te verhogen, bijvoorbeeld micro-stabiliteit.

Ten behoeve van een (semi)probabilistische beoordeling van de veiligheid op basis van faalkansen en partiële veiligheidsfactoren is een raamwerk gemaakt, dat bestaat uit een



foutenboom die is opgesteld met een toedeling van faalkansruimte aan verschillende beoordelingsaspecten.

De veiligheidsbenadering is opgesplitst in drie delen die hierna achtereenvolgens zijn beschreven:

- Veiligheidsbenadering deel 1: niveau normtraject of dijktraject.
- Veiligheidsbenadering deel 2: niveau doorsnede.
- Veiligheidsbenadering deel 3: niveau drainagetechniek.

3.4.2 Veiligheidsbenadering deel 1: niveau normtraject

De faalkans van een normtraject wordt opgedeeld in faalkanseisen per faalkansmechanisme. De faalkanseisen, gebaseerd op de standaardfaalkansbegroting, zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Type waterkering	Faalmechanisme	Type traject	
		Zandige kust	Overig (dijken)
Dijk	Overloop en golfoverslag ^a	0,0	0,24
	Opbarsten en Piping	0,0	0,24
	Macrostabiliteit Binnenwaarts	0,0	0,04
	Beschadiging bekleding en erosie	0,0	0,10
Kunstwerk	Niet sluiten	0,0 ^b	0,04
	Piping	0,0 ^b	0,02
	Constructief falen	0,0 ^b	0,02
Duin	Duinafslag	0,70	0,0 / 0,10 ^c
Overig		0,30	0,30 / 0,20 ^c
Totaal		1,0	1,0

Tabel 3.1 Verdeling van de faalkansbegroting over verschillende faalmechanismen, gebaseerd op (Rijkswaterstaat, 2017)

Opmerkingen in de tabel:

- Overloop en golfoverslag bij kunstwerken samengevoegd met overloop en golfoverslag bij dijken vanwege zeer sterke ruimtelijke correlaties met deze faalmechanismen bij kunstwerken en dijkvakken met dezelfde oriëntatie.
- Veel trajecten langs de zandige kust bevatten geen kunstwerken of dijken. Als dit wel het geval is, dan moet hoe dan ook van de hier gepresenteerde faalkansbegroting worden afgeweken.
- Voor dijktrajecten die voor een gedeelte uit duinen bestaan, zal duinafslag vaak een relatief kleine faalkansbijdrage leveren. Daarom is voor dergelijke gevallen 10% van de post 'overig' toegewezen aan duinafslag. Dit voorkomt dat voor dergelijke situaties een specifiek voorstel voor de faalkansbegroting moest worden verdeeld.

3.4.3 Veiligheidsbenadering deel 2: niveau doorsnede

3.4.3.1. Algemeen

In het tweede deel van de veiligheidsbenadering wordt de foutenboom op doorsnedeniveau opgesteld. De faalkanseis per doorsnede voor een bepaald faalmechanisme bedraagt:

$$P_{\text{eis,dsn}} = P_{\text{max}} * \omega / N \quad (3.1)$$



$P_{\text{eis,dsn}}$ is gelijk aan de faalkanseis die per doorsnede aan een faalmechanisme wordt gesteld. P_{max} is de maximaal toelaatbare overstromingskans van het betreffende dijktraject. Getalswaarden zijn opgenomen in (Rijkswaterstaat, 2017) en hebben als eenheid 'per jaar'. De factor ω is ontleend aan de bijdrage aan de faalkansbegroting voor het betreffende faalmechanisme. De factor N drukt het lengte-effect uit. Beide factoren zijn dimensieloos.

De bijdrage van binnenwaartse macrostabiliteit aan de standaard faalkansbegroting bedraagt 4%. De factor ω bedraagt dan 0,04 (Figuur 3.4). De bijdrage van piping en opbarsten aan de standaard faalkansbegroting bedraagt 24%. De factor ω bedraagt dan 0,24.

De factor N voor het lengte-effect wordt bepaald volgens:

$$N = 1 + a * L_{\text{traject}} / b \quad (3.2)$$

L_{traject} is gelijk aan de lengte van het dijktraject waarop de norm van toepassing is, uitgedrukt in m. De lengte van elk dijktraject is te vinden in (Rijkswaterstaat, 2017). De factor 'a' is de fractie (-) van de lengte van het dijktraject dat gevoelig is voor het betreffende faalmechanisme. De factor 'b' is de lengte van onafhankelijk equivalente vakken voor het betreffende faalmechanisme. De factoren a en b staan vermeld in Tabel 3.2.

Faalmechanisme	Watersysteem	Parameter a[-] fractie van de lengte gevoelig voor faalmechanisme	Parameter b [m] Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken
Piping	Bovenrivieren	0,90	300
	Overig	0,40	300
Macrostabiliteit	Alle systemen	0,033	50

Tabel 3.2 Factoren a en b ter bepaling van de faalkanseis voor de mechanismen piping en macrostabiliteit binnenwaarts (Rijkswaterstaat, 2017)

Aan de eis op doorsnedeniveau ($P_{\text{eis,dsn}}$) moet worden voldaan door een zodanig ontwerp op te stellen dat de partiële veiligheidsfactor voor de sterkte (schadefactor, opbarstfactor of heavefactor) in combinatie met de bijbehorende schematiseringsfactor voldoet. In het OI2014v4 zijn de relaties gegeven tussen de faalkanseis en de sterktefactoren.

3.4.3.1. In rekening brengen van de drainageconstructie

Door de introductie van een drainageconstructie in een waterkering moet de kans op falen door de mechanismen macro-instabiliteit en piping worden verkleind. Tegelijkertijd moeten er nieuwe faalmogelijkheden worden onderkend, namelijk falen van (onderdelen van) het drainagesysteem. In principe zijn er verschillende mogelijkheden om de faalkans van een drainagesysteem, en de invloed op de faalkans van de dijk, in rekening te brengen. De meest voor de hand liggende zijn:

- Uitvoeren van een volledige probabilistische benadering.
- Gebruik maken van een beschikbare semi-probabilistische benadering.

Zoals eerder in dit hoofdstuk is aangegeven, is een volledig probabilistische benadering altijd toegestaan. Deze benadering moet goed aansluiten bij de keuzes die gemaakt zijn in het WBI en OI. Een dergelijke probabilistische analyse is complex en een uitgewerkte handleiding is nog niet beschikbaar. In deze technische richtlijn is ervoor gekozen om zoveel mogelijk aan



te sluiten bij de semi-probabilistische benadering die in het OI2014v4 is uitgewerkt. Bij deze benadering horen de partiële veiligheidsfactoren die in de vorige paragraaf zijn vermeld.

Een drainagesysteem beïnvloedt de waterspanning via de stijghoogte in een watervoerende zandlaag of de ligging van de freatische lijn in het dijklichaam. In de huidige semi-probabilistische benadering moet de waterspanning steeds de 95% bovengrens zijn (Förster, van den Ham, Calle, & Kruse, 2012): de partiële veiligheidsfactoren zijn met onder andere dat uitgangspunt uitgewerkt. De waterspanning die wordt beïnvloed door een drainagesysteem moet daarom ook de 95% bovengrens zijn. Onzekerheden in de waterspanning worden door middel van de schematiseringsfactor in rekening gebracht. Dit betreft onzekerheden in de laagopbouw, geometrie, grondparameters zoals de doorlatendheid, binnendijkse waterstanden etc. Ook onzekerheden in het functioneren van de drainageconstructie kunnen hieronder worden verstaan.

Het niet of slechts gedeeltelijk functioneren van een drainagesysteem is dan één van de scenario's die de schematiseringsfactor bepalen.

Het bepalen van de faalkanseis voor de drainageconstructie verloopt dan als volgt:

- Stel een ontwerp op dat voldoet aan de eis ten aanzien van de schadefactor, waarbij de waterspanning is verlaagd door een drainagesysteem.
- Benoem scenario's die onzekerheden betreffen in geometrie, grondopbouw, grondparameters, overige aspecten en het drainagesysteem (via de te realiseren waterspanningen). De kansen op het optreden van andere scenario's worden geschat zoals te doen gebruikelijk (zie ook het OI2014v4), met uitzondering van faalkansen voor het drainagesysteem.
- Bepaal de stabiliteitsfactor bij een falend drainagesysteem (van het gewenste verloop afwijkende waterspanningen).
- Bepaal de maximaal toelaatbare faalkansen voor het drainagesysteem met behulp van de berekening van de schematiseringsfactor. Deze faalkans is de enige onbekende en daarom kan deze kans (iteratief) worden bepaald bijvoorbeeld door het rekenblokje te gebruiken dat bij het OI2014v4 hoort.

Een drainagesysteem kan echter ook gedeeltelijk falen. Gedeeltelijk falen kan als apart scenario in de schematiseringsfactor worden opgenomen. Hierbij moet wel worden bedacht dat verschillende faalscenario's van een drainagesysteem meestal niet tegelijkertijd kunnen optreden. Het zijn daarom onafhankelijke scenario's, die naast elkaar moeten worden beschouwd. Elk van de scenario's geeft een aparte eis van de faalkansen voor dat scenario.

Door middel van een foutenboomanalyse kan worden aangetoond dat het drainagesysteem voldoet aan de eis voor de faalkansen. Zo nodig moet per faalscenario een aparte foutenboom worden opgesteld. Dit is het derde deel van de veiligheidsbenadering.

Deze benadering kan voor macrostabiliteit, opbarsten en heave worden gebruikt. Voor microstabiliteit is de veiligheidsbenadering nog niet zover uitgewerkt. De betrouwbaarheid van een drainageconstructie kan voor microstabiliteit daarom het beste worden uitgewerkt op basis van de eis die vaak geldt in de semi-probabilistische benadering voor de waterspanning: dit moet een 95% bovengrens zijn.

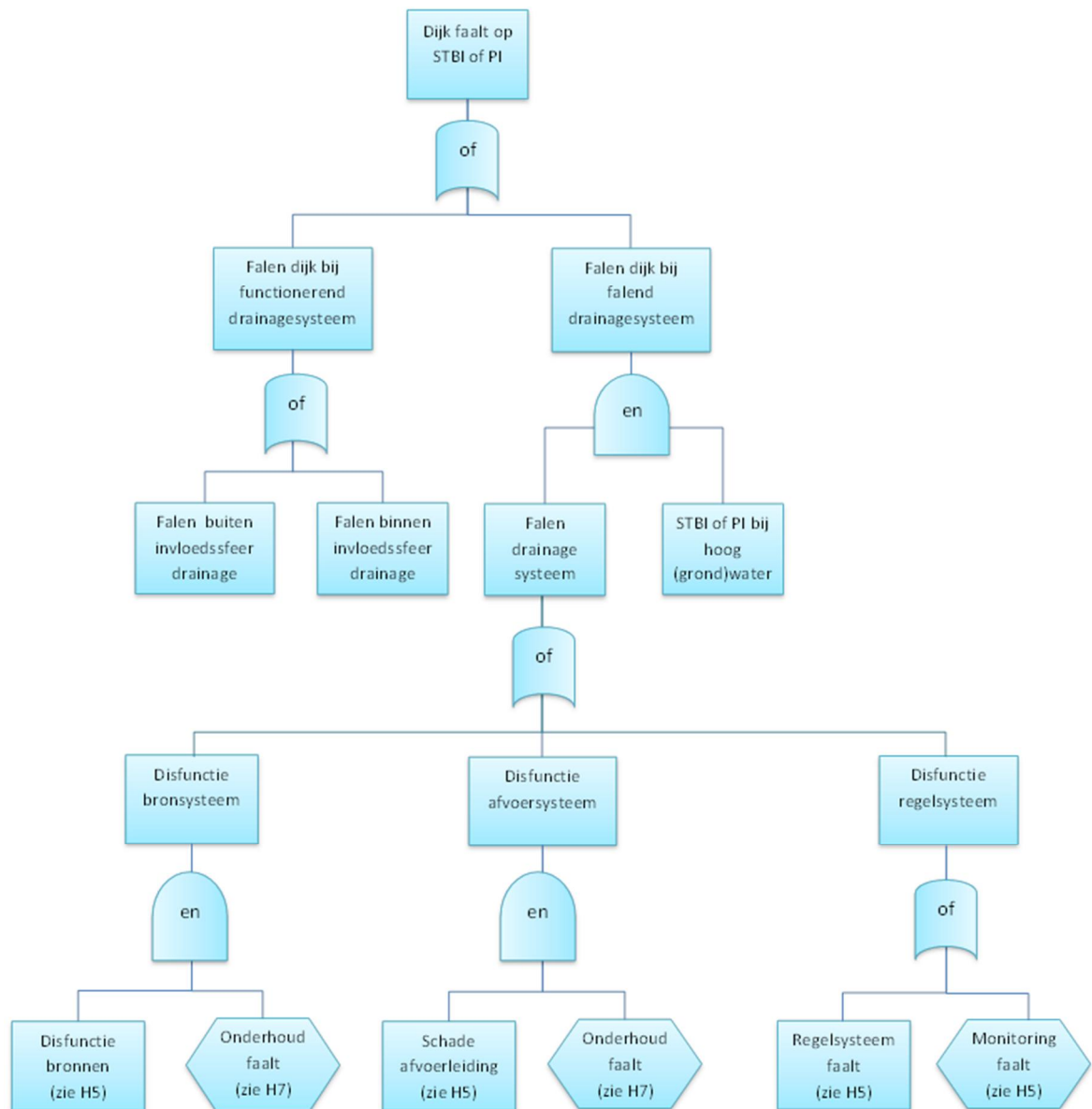


Binnen het WBI2017 is geen standaard methode beschikbaar voor de beoordeling van de combinatie van een waterkering en een drainagesysteem, zodat een 'Toets op Maat' moet worden uitgevoerd. Opgemerkt wordt dat een drainagesysteem een nieuw element is en het is ook een extra element met faalkansen. Door middel van monitoring kan echter wel meer zekerheid bestaan over de waterspanning. Bij sommige typen drainageconstructies is de waterspanning direct of indirect actief te beïnvloeden. Dit verlaagt de faalkans van de waterkering en kan in de foutenboomanalyse een plaats krijgen.

3.4.4 Veiligheidsbenadering deel 3: niveau drainagetechniek

3.4.4.1 Foutenboomanalyse

In het derde deel van de veiligheidsbenadering wordt de foutenboom van de drainagetechniek opgesplitst naar de verschillende samenstellende elementen. Een voorbeeld tot op het deelniveau van de systeemelementen is gegeven in Figuur 3.6. Een verdere uitwerking van de foutenboom voor de verschillende daaronder liggende systeemelementen is te vinden in Hoofdstuk 5.



Figuur 3.6 Schematische weergave van de foutenboom op basis van verschillende onderdelen van de maatregel

In de foutenboom zijn gebeurtenissen opgenomen voor de werking van de monitoring en voor het onderhoud. In de betrouwbaarheidsanalyse moet de foutenboom specifiek worden gemaakt voor de in te zetten techniek en de uitvoering van de maatregel. Voor een specifiek gebruik voor bepaalde mogelijke drainagesystemen, kunnen elementen uit de weergegeven generieke foutenboom (Figuur 3.6) worden weggelaten of daaraan worden toegevoegd, bijvoorbeeld voor het falen van pompen of van meetsensoren. Aan alle elementen moeten faalkansen worden toegekend. Bij onvoldoende informatie moeten deze faalkansen worden geschat.

3.4.4.2 Faalkansanalyse: decompositie systeem

Voor een drainagesysteem dient een faalkansanalyse opgesteld te worden door het systeem op te delen in onderdelen (decompositie). Vervolgens worden per onderdeel faalmechanismen benoemd en gekwantificeerd. Toepassing van een drainagesysteem moet leiden tot een lagere faalkans voor de waterkering. Echter, de faalkans van het



drainagesysteem zelf moet ook worden bepaald. Bij de faalkansanalyse is het van belang onderscheid te maken tussen de onderdelen (bijvoorbeeld de bronnen) en het collectieve systeem (bijvoorbeeld het afvoerstelsel).

Er kan sprake zijn van passieve drainagesystemen (met een overloop die gaat werken of wordt geopend zodra de stijghoogte van het grondwater een drempelniveau overschrijdt, met afvoer van het vrijkomende grondwater onder vrij verval) of van actieve systemen (met een pomp die wordt aangeschakeld zodra de grondwaterdruk een alarmwaarde overschrijdt, en opgepompt grondwater afvoert via een afvoerleiding).

Een passief drainagesysteem kan uit verschillende onderdelen bestaan:

- Het winmiddel (filter van de onttrekkingsput, overloopbron of drainage).
- De buisleiding vanaf filter tot bronkop aan maaiveld.
- De bronkop met connectie naar afvoerleiding met afsluiter.
- De afvoerleiding naar de overloopput.
- De overloopput.
- De afvoerleiding van overloopput naar ontvangend water.
- Het lozingspunt op ontvangend water.
- Het bergend oppervlak van ontvangend water.
- Doorspuitpunten in het leidingsysteem.

Bij toepassing van een actief drainagesysteem komen daar nog de volgende onderdelen bij:

- Een pomp.
- Een drukopnemer of peilbuis met sensor om de pomp aan te schakelen.
- Een regelsysteem dat de sensorpuls vertaalt naar aanschakeling van een elektrisch circuit dat de pomp aanstuurt.
- Een stroomvoorziening die energie levert aan de pomp.

Het falen van een onderdeel is te wijten aan diverse oorzaken die elk tot falen van het systeem kunnen leiden. De faalmechanismen van de onderdelen zijn:

- Breken/knikken.
- Barsten.
- Beschadigd raken door externe oorzaken.
- Menselijke bedieningsfouten.
- Verstopping door dieren/planten.
- Zand- en ijzerafzetting.
- Luchtopsluiting.
- Bevriezing.
- Stroomstoring.

In hoofdstuk 5 en 6 wordt verder ingegaan op het ontwerp van de verschillende drainagesystemen.



3.4.5 Maatregelen om faalkansen van onderdelen te verkleinen

In de betrouwbaarheidsanalyse voor drainagesystemen moet rekening worden gehouden met het feit dat er drie belangrijke factoren voor falen zijn:

- Menselijke fouten (bijvoorbeeld bij het bedienen van een afsluiter).
- Verticale vervormingen (zettingen) (bijvoorbeeld een maaiveldddaling van 0,5 cm/jaar gedurende een periode van 50 jaar). Er kunnen verschilzettingen optreden in het leidingsysteem omdat een bronbuis star in het zand gefundeerd staat en de verzamelleiding zich in de zettingsgevoelige laag bevindt die door het gewicht van de waterkering aan zakking onderhevig zal zijn.
- Horizontale vervormingen van het drainagesysteem (bijvoorbeeld als er sprake is van ophoog- of graafwerkzaamheden).
- Optreden van een verstopping in een drain.

De kans op falen van onderdelen kan verlaagd worden door aanpassing van het ontwerp en/of het uitwerken van beheersmaatregelen. Nadat de foutenboom is opgezet en een eerste kwantificering is gedaan⁵, blijkt welke aspecten een belangrijke bijdrage in de faalkans veroorzaken. Wordt de topeis niet gehaald, dan is aanpassing of aanscherping van het ontwerp nodig, of kunnen beheersmaatregelen worden ingebracht.

Menselijk falen werkt in de faalkans vaak dominant door. Voor menselijke fouten (afsluiter bij bron dicht in plaats van open of een verkeerde afstelling in een verzamelput) is in project Schoonhovenseveer-Langerak (SLa) een kans aangehouden van 1.10^{-3} per onderhoudsmoment (met een lage kans vanwege hantering van een protocol).

Voor oorzaken als breken/knikken, barsten en beschadiging door externe oorzaken ligt het voor de hand om het ontwerp aan te passen: strengere sterkte-eisen en de lay-out van de ondergrondse infrastructuur aanpassen. Regelmatige inspectie en zo nodig herstelmaatregelen doorvoeren, verlagen echter ook de faalkans. Vanzelfsprekend is regelmatige inspectie ter bevestiging van het correcte functioneren, in alle gevallen aan te raden.

Om de robuustheid van een drainagesysteem aan te tonen of te beoordelen mag in de faalanalyse gebruik worden gemaakt van herverdeling: andere onderdelen kunnen de werking van een falend onderdeel overnemen. Dit kan bijvoorbeeld zijn bij falen van één bron wanneer herverdeling mag plaatsvinden naar twee naastgelegen bronnen. Ook voor afvoerleidingen kan dit principe worden toegepast. Door de afvoerleidingen naar de overstortputten te koppelen kan zo ook herverdeling plaatsvinden bij falen van een leiding.

Andere mogelijkheden om de faalkansen van componenten te verkleinen zijn bijvoorbeeld:

1. Via het ontwerp, bijvoorbeeld:
 - Opnemen van roosters in afvoer en openingen.
 - Overdimensionering van leidingdiameters.
 - Ontluchtingsgaten.
 - Verzamelleiding lager dan aansluiting bron.
 - Dubbele uitstroom: onder en boven water.
2. Door gericht beheer en onderhoud:
 - Jaarlijkse inspectie en periodiek onderhoud.
 - Inspectie bij samenvol hoogwater en zware vorst.

⁵ Aanbevolen wordt om hierbij een specialist op het gebied van risicoanalyses bij te betrekken



3. Door monitoring

- Signalering van hoge waterstand in bronnen.

Deze drie opties worden in de volgende paragrafen nader toegelicht. Opgemerkt wordt dat deze uitwerking vooral gericht is op bronneringssystemen. Onderdelen kunnen echter ook voor andere typen drainageconstructies worden gebruikt. In de separaat te verschijnen Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijnen voor bronneringssystemen, DMC en grindkoffers wordt dit verder uitgewerkt. Deze richtlijnen komen naar verwachting in 2017 beschikbaar via de POV-Piping.

In hoofdstuk 5 wordt het ontwerp van een drainagesysteem nader uitgewerkt. Als onderdeel van het ontwerpproces (paragraaf 5.2) is een rekenvoorbeeld gegeven (paragraaf 5.2.2.2).

3.4.5.1 *Optimalisatie van veiligheid via het ontwerp*

Op basis van de faalkansanalyse kan het ontwerp geoptimaliseerd worden. Optimalisatie kan bijvoorbeeld worden bereikt door te streven naar zo min mogelijk menselijke handelingen bij de bediening en het onderhoud van het systeem en een systeem dat onafhankelijk van energievoorziening of aansturing kan werken (bewust toepassen van een “low tech” passief systeem).

Voor het bepalen van de kans op falen van de waterkering door falen van het drainagesysteem, is informatie nodig over kans op schade aan onderdelen van het systeem zoals leidingen. Bij de leidingbeheerders, nutsbedrijven en aannemingsbedrijven zijn waarschijnlijk databases met faalgegevens te vinden. Ook nader onderzoek bij instanties zoals KEMA is mogelijk om over de faalkans van leiding- en bronsystemen meer informatie beschikbaar te krijgen. Binnen het opstellen van dit TR was geen plaats voor dit onderzoek. De ontwerper moet daarom zelf invulling geven aan het optellen van de foutenboom en de kwantificering van de faalkansen. Aangeraden wordt om hiervoor een specialist op dit terrein in te schakelen.

Specifieke mogelijkheden om via het ontwerp de faalkans te verkleinen zijn bijvoorbeeld:

- Hanteren van een minimale gronddekking boven leidingen en andere ondergronds afgewerkte systeemonderdelen (volgens NEN 3650 is dat 0,8 m).
- Afschermen van het drainagesysteem (bronnen en leidingen) zodat dit niet bereikbaar of berijdbaar is voor zwaar materieel bij onderhoud van de dijk, door de leiding herkenbaar te maken (markering) of door barrières op maaiveld (hekwerk).
- Verlagen van de kans dat de leiding wordt geraakt door de leiding af te schermen (afdekplaten, betontegels); het verlagen van de kans dat de leiding wordt geraakt.
- Vergroten van de wanddikte van het leidingmateriaal.

3.4.5.2 *Inzet van beheer en onderhoud*

Indien een waterkering is voorzien van een drainagemaatregel, dient de controle nadrukkelijk gericht te zijn op het beheer en onderhoud. Verschillende maatregelen kunnen worden ingezet om functionele gebreken tijdens gebruik van het systeem te beheersen:

- Hanteren van een draaiboek voor beheer en onderhoud.
- Controle van de werking van het systeem opnemen in het programma van inspectieronden.
- Uitvoeren van planmatige monitoring van vervormingen van het dijkprofiel ter plekke van een ingerichte drainagemaatregel.



- Toepassen van leidingdetectie bij de uitvoering van onderhoudswerken.
- Registratie van drainagevoorzieningen op de leggerkaarten en bij KLIC.

Al deze maatregelen dienen in een beheer- en onderhoudsplan te worden opgenomen. De beschrijving van beheer en onderhoud is opgenomen in hoofdstuk 7.

Het onderhoudsprogramma moet zodanig worden afgestemd dat dit voldoende bijdrage levert aan de vermindering van de faalkans.

3.4.5.3 *Inzet van monitoring en herstel*

Het is essentieel om het functioneren van een drainagesysteem te monitoren. Bij de opzet van een faalkansbegroting voor het effect van een drainerende voorziening moet vanzelfsprekend monitoring en onderhoud worden meegenomen. Monitoring kan worden uitgevoerd door stijghoogtemetingen en controle van het debiet uit het lozingspunt in het drainagesysteem. Het uitvoeren van monitoring werkt door in de faalkansanalyse en dus in de betrouwbaarheid van de waterveiligheid. Het doel van monitoren is het bereiken van een lagere faalkanseis van het systeem en tevens om het ontwerp, en de aannamen die daarin gedaan zijn, te verifiëren. Monitoring is niet alleen van belang om de faalkans te beperken, maar is essentieel bij de beoordeling van de veiligheid volgens het WBI.

Met betrekking tot monitoring moet de nodige aandacht worden besteed aan de meetnauwkeurigheid (vooral de nauwkeurigheid in de hoogte), de betrouwbaarheid en de controleerbaarheid van de metingen.

Om de kwestie van menselijk falen en ook de bewaking van het systeem als geheel te verbeteren, kan monitoring met een actieve signalering aan het drainagesysteem worden toegevoegd. Dit kan worden uitgevoerd door middel van een signalering in de bronbuis en in de overstortput. De automatische signalering heeft ten tijde van hoog water het effect dat falen van onderdelen momentaan wordt geregistreerd in plaats van pas na een periodieke inspectie. Het verwerken van een binnenkomend signaal is weliswaar ook mensenwerk, maar reduceert significant de kans op een foute afstelling van de schotbalken en van de afsluiter. De foutenboom zal dan met het deelsysteem van actieve signalering moeten worden uitgebreid.



4 Geohydrologische systeemanalyse

4.1 Algemeen

4.1.1 Geohydrologie en grondmechanica

Dit hoofdstuk gaat in op de omstandigheden als een drainagesysteem in of nabij een dijk wordt toegepast en behandelt de modellering van de grondwaterstroming. Het model dient gebruikt te worden bij de dimensionering van een drainagesysteem. De geohydrologie (grondwaterstroming) en de grondmechanica (ontwikkeling van waterspanningen in de grondlagen) hangen sterk met elkaar samen. Beide disciplines zijn van belang bij de analyse om het gewenste effect van een drainagesysteem op macrostabiliteit en piping te bepalen. Om de samenhang met geohydrologische systeemanalyse duidelijk te maken, is eerst kort gememoreerd wat in oudere documenten al is beschreven over waterspanningsanalyse.

4.1.2 Inleiding over waterspanningen

Het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies TRWG (TAW, 2001) behandelt de hoofdlijnen voor de afleiding van waterspanningen in een dijklichaam en de ondergrond. Het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TRW) (ENW, 2004) vormt een aanvulling op, en een verdieping van het TRWG. Het TRW geeft uniforme en objectieve richtlijnen, aandachtspunten en waarschuwingen bij het vaststellen van de schematisering van relevante waterspanningen. De focus ligt vooral op het bepalen van waterspanningen in het dijkprofiel.

Het TRW rapport (ENW, 2004) benadrukt dat de ontwikkeling van het effect van waterspanningen in waterremmende, samendrukbare lagen niet direct met het gebruikelijke geohydrologische modelinstrumentarium kan worden bepaald. Een aanvullende analyse met grondmechanische modellen zal daarom moeten plaatsvinden. Het is belangrijk om te begrijpen dat drie verschillende fysische processen de waterspanning beïnvloeden (ENW, 2004). Het gaat daarbij om:

1. Waterspanningen die veroorzaakt worden door de grondwaterstroming

In het dijklichaam worden de waterspanningen bij het optreden van stroming voornamelijk beïnvloed door:

- Waterstandsverschillen binnendijks en buitendijks als gevolg van extreme of sterk variërende waterstanden buitendijks en beheerste polderpeilen of lage grondwaterstanden binnendijks.
- Golfoverslag vanaf de rivier of het buitenwater op het dijktaalud.
- Infiltreren van neerslag en verdampen van bodemvocht.

2. Waterspanningen die samenhangen met de grondspanning

Dit betreft de bijkomende tijdelijke waterspanningen, als gevolg van een toename van grondspanningen door bijvoorbeeld ophogingswerkzaamheden in de uitvoeringsfase of tijdens onderhoud (dijkversterking) en andere wisselende belastingen (verkeersbelastingen). Deze verschillende bijdragen aan de waterspanning worden bij elkaar opgeteld. Onderscheid kan worden gemaakt in ongedraineerde situaties (in klei- en veenlagen) en in gedraineerde situaties (in zandpakketten), en de aanpassing door consolidatie en kruip van samendrukbare lagen op de langere termijn.

3. Waterspanningen die veroorzaakt worden door vervorming (tweedimensionaal).

Dit aspect houdt verband met wateroverspanningen die worden opgewekt door instantane (tweedimensionale) vervormingen en doorgaande (elasto-plastische) schuifvervormingen.



Voor het beoordelen van falen van een waterkering als gevolg van macro-instabiliteit en piping moet vooral de invloed van het eerste fysische proces worden onderzocht. Alleen als een waterkering tijdens het optreden van hoogwater nog effecten ondervindt van de constructiefase, kan het tweede proces een rol spelen. Indien vervormingen, het derde proces, optreden dan moet met gedetailleerde modellen (zoals PLAXIS) het vervormingsgedrag worden onderzocht. Vervormingsgedrag kan belangrijk zijn wanneer er drainagetechnieken worden voorzien nabij een (waterkerende) constructie, zoals damwanden, of wanneer leidingen van het drainagesysteem kans op schade kunnen ondervinden als gevolg van de vervorming.

Het TRW vormt een leidraad bij de advisering betreffende waterspanningen in dijken onder verschillende waterstanden (maatgevend hoogwater, ontwerpwaterstand). Het TRW beschrijft dan ook hoe de waterspanningen veranderen. Bovendien worden handvatten gegeven voor het schematiseren en het opzetten van modellen voor:

- De effecten op de freatisch grondwaterstand.
- De stijghoogte in tussenzandlagen.
- De stijghoogte in de watervoerende zandlaag, met speciale aandacht voor:
 - Invloed van de buitenwaterstand op grondwaterspanningen.
 - Infiltratie uit neerslag en golfoverslag.
 - Door vervormingen geïnduceerde grondwaterspanningen (dit laatste punt is alleen van belang voor macrostabiliteit langs glijvlakken en niet voor drainagesystemen).

4.1.3 Betekenis voor de inzet van drainage

Het hiervoor beschreven TRW heeft vooral betrekking op een tweedimensionale modellering, en dan nog voornamelijk in een dwarsdoorsnede van de waterkering (dijk). In diverse situaties zijn daarbij verschillende aandachtspunten van belang:

- Dijk in het benedenrivierengebied: waarschijnlijk een deklaag bestaande uit klei en veen; de langdurige hoge waterstand ontstaat door de rivierafvoer en het getij.
- Dijk in het bovenrivierengebied: waarschijnlijk een kleidijk, waarschijnlijk een zandige ondergrond; de langdurige hoge waterstand hangt af van de rivierafvoer.
- Boezemkade: waarschijnlijk een deklaag bestaande uit klei en veen; langdurig (bijna stationair) verval van beheerst oppervlaktewaterpeil naar polderpeil.
- Meerdijk: kleinere variatie in meerstand. Nadruk op het buitentalud (in verband met golfslag en deining door windopzet).
- Zeedijk: aandacht voor getij, storm en opwaaiing. Golfoploop en golfbelasting zijn daar de maatgevende factoren.

Hieruit wordt duidelijk dat voor de faalmechanismen macrostabiliteit en piping geldt dat de voorspelling daarvan sterk afhankelijk is van de gehanteerde ondergrondschematisatie, geometrische kenmerken en het te keren verval over de waterkering. Het verval wordt gedefinieerd als het verschil in hoogte tussen de waterstand in het buitenwater en het polderpeil. Bovendien zijn de verdeling van de korrelgrootte en de doorlatendheid van de zandige laag belangrijke aspecten die een rol spelen bij het faalmechanisme piping.

Bij hoogwater op de rivier gaat de grondwaterstijghoogte in het watervoerende pakket evenredig mee omhoog, zeker indien de rivier insnijdt in het watervoerende pakket. Aan de polderzijde zal de grondwaterdruk in de watervoerende laag ver in het achterland voornamelijk worden beïnvloed door polderpeil of freatische grondwaterstand. De stijghoogte



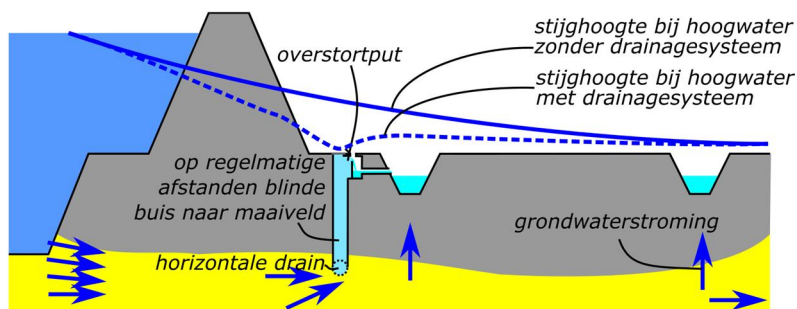
in de watervoerende laag onder het voorland, de waterkering en het achterland verloopt daarom van de hoogwaterstand op de rivier naar het polderpeil in het achterland.

Ook als tussenzandlagen in de holocene deklaag onder de waterkering aanwezig zijn, kan de stijghoogte en waterdruk daarin toenemen, met het gevolg dat de dijkstabiliteit bij hoogwater in gevaar kan komen. Bij het project SLA speelde dit fenomeen een belangrijke rol.

Het toepassen van een drainagetechniek grijpt in op het natuurlijke verloop van de grondwaterstand in de dijk naar het achterland. Echter, deze ingreep zou alleen moeten werken op het moment dat dit nodig is om de veiligheid van de waterkering te blijven garanderen bij hoogwater in de rivier. Door de inzet te beperken wordt de afvoer door het drainagesysteem beperkt, dit is positief voor het vereiste onderhoud, omgeving beïnvloeding en waterbezwaar in het achterland. De berekeningen van stabiliteit en/of piping moeten dan uitwijzen of volstaan kan worden met het “scalperen” van een hoge grondwaterstand als gevolg van een hoogwatergolf, of dat het nodig is om fors te moeten “koppensnellen”.

Het toekomstige verloop van de stijghoogte van het grondwater over de breedte van de waterkering moet worden berekend met geohydrologische modellen. Het (toekomstige) verloop wordt vooral bepaald door de hydraulische weerstand van de bodem van de rivier, van de toplaag en door de variatie van die weerstanden. Het gaat daarbij over of onder het voorland, onder de waterkering en onder het achterland.

De inzet van een drainagetechniek (reeks van verticale bronnen of horizontale drains) aan de binnentoe van de waterkering verlaagt de stijghoogte in de watervoerende laag. Het gevolg is dat de waterdruk onder de waterremmende lagen, die opdrijven in het achterland bepaalt, en de waterspanning in de waterremmende lagen, waardoor eventueel afschuiving kan optreden, worden verminderd.



Figuur 4.1 Stijghoogteverloop over de waterkering met en zonder drainagesysteem

Met behulp van geohydrologisch modelleren wordt het verloop van de stijghoogte berekend in de watervoerende lagen. De aanpassing van de waterspanning in de waterremmende lagen onder de waterkering wordt berekend met behulp van een grondmechanisch model naar de zogenaamde mate van indringing (zie verder paragraaf 4.5).

Indien de stijghoogte in de watervoerende laag, of in de freatische laag, verandert ten gevolge van hoogwater op het buitenwater, dan zal de waterspanning in de waterremmende laag zich ook gaan aanpassen. Deze aanpassing begint op het grensvlak tussen de lagen en verloopt traag als gevolg van de geringe doorlatendheid van de waterremmende laag. De laagdikte waarover de aanpassing merkbaar is gedurende de periode van hoogwater, wordt de indringingslengte genoemd. De omvang wordt gedomineerd door het consolidatieproces dat tijdsafhankelijk is. Een nadere uitwerking is vermeld in paragraaf 4.6.



- Een geohydrologische modelstudie om de grondwaterstroming in beeld te brengen en de verandering van de grondwaterstanden onder de waterkering door de werking van een drainagesysteem tijdens hoogwater.
- Een grondmechanische modelstudie om de veiligheid van de waterkering tegen verlies van macrostabiliteit en / of piping te bepalen met toepassing van een drainagesysteem onder omstandigheden met hoogwater.

Over het doorlopen van de zes stappen wordt een verduidelijking gegeven:

Stap 1 tot en met 4:

Inzicht in de opbouw van de ondergrond en van de waterkering is nodig voordat met modelleren wordt gestart. Dit inzicht is vereist ten behoeve van de beoordeling van de geotechnische stabiliteit van waterkeringen zodat effecten van bodemopbouw, hydrologie, belastingcombinaties en bijbehorende waterspanningen op de stabiliteit van een dijk correct worden meegenomen. Informatie uit bestaande databases en ondergrondmodellen zal moeten worden verzameld en bovendien zal onderzoek naar de ondergrond en grondwaterstand moeten worden uitgevoerd. Dit onderzoek is beschreven in paragraaf 4.2. Uit de metingen naar de waterstand moeten de lokale geohydrologische omstandigheden en eigenschappen naar voren komen voor de dwarsdoorsneden van de dijk die maatgevend zijn bevonden voor de onderscheiden dijktrajecten.

Bij de studie van beschikbare data wordt voorgesorteerd op een onderscheid naar lokale scenario's passende binnen de aan te houden SOS-systematiek (stochastische ondergrond schematisatie, zie paragraaf 4.2). Voor de te beschouwen scenario's, dient de ontwerper of toetser de geohydrologische eigenschappen af te leiden. In eerste instantie kan de geohydrologische schematisatie van de lagen en de vaststelling van eigenschappen, de parameters, plaatsvinden met informatie uit bestaande databases, bijvoorbeeld afkomstig van het DINO-loket.

Stap 5

De modelvorming met relevante ijking of validatie staat beschreven in paragraaf 4.3. Globale berekeningen om de omvang van de benodigde drainage-ingreep in een eerste verkenning te bepalen, kunnen worden uitgevoerd met een numeriek model van de doorsnede en met analytische rekenregels (stationair met een rekensheet). Als uit de eerste verkenning blijkt dat de inzet van drainagemaatregelen een haalbare optie is voor het verbeteren van de veiligheid van de waterkering, dan dienen de geohydrologische schematisatie van de bodemlagen en de keuze van parameters in meer detail te worden afgeleid, uit uitgevoerde praktijkmetingen (sonderingen, boringen, meetraaien met peilbuizen, pompproeven).

De huidige grondwaterstand en stijghoogte moet gemeten worden om een vergelijking te kunnen maken met de berekende situatie aan de hand van grondwatermodellen. Als de overeenkomst juist is dan kan vervolgens met het model de verandering in grondwaterspanning door het toepassen van drainagetechnieken voorspeld worden.

Als de lokale geohydrologie, de ruimtelijke effecten en de drainagemaatregel eenvoudig te schematiseren zijn, dan kan een model bestaande uit een tweedimensionale doorsnede afdoende zijn. De situatie kan worden doorgerekend door gebruik te maken van een geschikt ontwerpinstrument (stationair met analytische berekeningen of met 2D-ModFlow/MicroFEM en niet-stationair met DG-Flow, dat vanaf medio 2017 beschikbaar is, of met). Met een dergelijk instrument kan worden nagegaan of alle geohydrologische fenomenen goed begrepen worden of dat informatie ontbreekt. De gevoeligheid voor piping kan eveneens berekend worden met het computerprogramma MSeep - of met een rekensheet (Helpdesk



Water, 2016). Mocht toepassing van deze computerprogramma's niet tot gewenste resultaten leiden, dan kan gebruik worden gemaakt van DGFlow.

Wanneer de situatie complexer is, of wanneer een definitief ontwerp van een drainagevoorziening moet worden gemaakt, dan moet een omvangrijk driedimensionaal model worden ontwikkeld. In eerste instantie gaat het vooral om een conceptueel model van de ondergrond met de grondwaterstroming en van de dijkstabiliteit. Voorbeelden van geschikte rekenprogramma's om grondwaterstromingsmodellen samen te stellen voor het drainageontwerp, zijn het eindige differentieprogramma ModFlow (in verschillende uitvoeringen zoals PM, Visual, GMS of iMod dan wel iModFlow) of een eindig elementenprogramma zoals MicroFEM en FE-Flow. Op basis van een beschikbaar regionaal grondwatermodel, te verkrijgen via het betreffende waterschap, kan een eerste schatting voor de parameterwaarden worden uitgevoerd. Daarna moeten de verzamelde resultaten van het grondonderzoek worden toegevoegd aan het model en dient het model te worden verfijnd (met het oog op de resolutie en het aantal modellen voor de deklaagschematisatie) en geijkt voor de lokale situatie bij de waterkering onder de omstandigheden die in praktijk zijn gemeten. Regionale modellen (zoals MORIA) hebben vaak een resolutie van 25m, maar voor de geohydrologische berekeningen voor waterkeringen is vaak een fijnere resolutie nodig.

Stap 6

De gevolgen van een verandering van de waterspanning in de waterkering op de veiligheidsfactor voor bijvoorbeeld het faalmechanisme macrostabiliteit, zal moeten worden gemodelleerd met een grondmechanisch ontwerpinstrument zoals D-GeoStability of Plaxis. De wijze waarop dat zal plaatsvinden, is afhankelijk van de doelstelling van de analyse. Voor een beoordeling of toetsing zal uitwerking plaatsvinden via D-GeoStability en bijvoorbeeld de Waternet Creator zoals deze zijn ingebouwd in Basis Module (BM) Macrostabiliteit, de versie van D-GeoStability binnen het WBI. Voor een ontwerp zal afhankelijk van de complexiteit uitwerking plaatsvinden via D-GeoStability en de Waternet Creator als de situatie eenvoudig is, en via PLAXIS als de situatie een nadere, gedetailleerde studie behoeft. Voor piping kan de beoordeling of toetsing worden uitgewerkt met een rekensheet, MSeep of DG-Flow.

De invulling van randvoorwaarden met betrekking tot optredende grondwaterstanden in de modellen D-GeoStability of PLAXIS, en MSeep of DG-Flow moet worden afgeleid uit resultaten die verkregen zijn uit een inventarisatie of metingen van grondwaterstanden in de regio of uit de driedimensionale regionale geohydrologische modellering.

De volgende stappen worden gewoonlijk doorlopen bij het schematiseren van de stijghoogte in een dijk en in de ondergrond:

1. Bepalen van de stijghoogte in het watervoerende pakket en/of in de tussenzand-lagen in de deklaag, rekening houdend met waterstandsfluctuaties en met de tijdsduur van het hoogwater.
2. Controleren opdrijven / opbarsten (grenspotentiaal) van de deklaag achter de dijk.
3. Bepalen van de ligging van het freatische vlak, rekening houdend met indringing ten gevolge van de aanpassing van de waterspanning in de onderliggende bodemlaag.
4. Bepalen van de aanpassing / indringingslengte in het slappe-lagenpakket, rekening houdend met indringing ten gevolge van aanpassing en consolidatie.
5. Bepalen van het verloop van de waterspanning in de deklaag achter de dijk, rekening houdend met indringing.



Om van een geohydrologische modellering naar een grondmechanische modellering te komen, is een verdergaande schematisering nodig. Deze schematisering betreft zowel het grondprofiel als de geohydrologische situatie. Bij de schematisering van het grondprofiel gaat het dan in de eerste plaats om het dijkprofiel. In principe is een dijk een weinig doorlatend element, dat in Nederland rust op een watervoerend en onsamendrukbaar zandpakket (Pleistoceen) dat meestal is afgedekt met een semi-doorlatende toplaag (Holoceen). Het dijkprofiel kan daarom bestaan uit een doorlatend of een ondoorlatend dijklichaam, dat bovendien meer of minder homogeen van opbouw is. De dijk ligt ofwel direct op een doorlatende ondergrond of op een ondoorlatende ondergrond. Verder zal op de dijk een afdeklaag aanwezig zijn.

De opbouw van een dijk beïnvloedt dus de ligging van de freatische lijn in de dijk. Het verloop van de freatische lijn hangt af van (zie ook bijlage b1.3.3 van de TRW):

- De gemiddelde grondwaterstand (of referentieniveau) in het profiel.
- De grondwaterstand in het profiel passend bij Gemiddeld hoog water (GHW).
- De binnendijkse waterstand in het achterland tijdens gemiddelde en maatgevende omstandigheden.
- De maatgevende hoogwaterstand (MHW) van het buitenwater.
- Het verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket.
- De neerslag; grote neerslag wordt vertaald in een verhoging van de freatische lijn. De golfoverslag in het riviereengebied werd vaak verwaarloosd, maar zal tevens beschouwd dienen te worden en daar waar significant moeten worden meegenomen.

Op basis van het dijkprofiel, samen met de waterstanden voor en achter de dijk, en de benodigde opzet wordt de freatische lijn vastgelegd. Mede op basis van de informatie over het verloop van de stijghoogte is een profiel van de waterspanning af te leiden voor elke positie in de dwarsdoorsnede van de waterkering. Het profiel wordt bepaald door de potentiaal (PN-lijnen) boven de indringlengte en in het watervoerende pakket. Deze waarden zijn af te leiden uit de informatie, maar berekenen van het verloop van de freatische waterstand met MSeep of DG-Flow kan ook.

De waterspanningen ten gevolge van de belasting moeten worden opgeteld bij de referentiesituatie. De belasting van het buitenwater veroorzaakt vaak een directe verandering van de stijghoogte in het watervoerende pakket en geleidelijk aan ook van de stijghoogte in de kering zelf (freatische lijn, waterspanningen in de toplaag en de dijk). Soms zijn ook diepere watervoerende lagen van invloed op het stromingsbeeld. Voor het uitrekenen van de waterspanningen in het dijkprofiel is het van belang om ook externe belastingen mee te nemen, bijvoorbeeld vanwege verkeer op de dijk tijdens hoogwater voor het nemen van noodmaatregelen. Dit is meestal kortdurend en daarom wordt hiervoor geen aanpassing berekend. Permanente belasting, bijvoorbeeld door dijkversterking, zorgt voor een directe verandering van de waterspanningen in de kering zelf. Aanwezigheid van capillair effect in de onverzadigde zone op de grondwaterspanning in de waterkering wordt bij de analyse niet meegenomen.

De bepaling van de grondmechanische schematisatie en de waterspanningen is verder beschreven in paragraaf 4.6.



4.2 Opzet en uitwerking ondergrondmodel

4.2.1 Informatie ter bepaling van de bodemopbouw

Verschiedende bronnen van informatie zijn beschikbaar om daaruit een eerste opzet van een schematisatie voor een ondergrondmodel af te leiden. De meest voor de hand liggende bron betreft de topografische informatie van de locatie waaruit de ligging van de waterkering ten opzichte van de rivier en andere waterhuishoudkundige elementen naar voren komt, en de terreinhoogte in de omgeving. De belangrijkste bron wat de ondergrondgegevens betreft is het DINO-loket (TNO, 2016). Het DINO-loket is het uitgifteportaal van TNO, Geologische Dienst Nederland, waar alle gegevens over de ondergrond gratis bekeken en opgevraagd kunnen worden. Deze gegevens bestaan uit (interpretaties van) boringen en sonderingen. Globale kennis van de geologie is nodig om te bepalen welke gegevens van belang zijn om de ondergrond te schematiseren en welke data eventueel nog ontbreken.

4.2.1.1 Topografie en waterhuishouding

Informatie over de hoogteligging van het gebied is belangrijke informatie voor de modelvorming. De aanwezigheid van voorland of uiterwaarden voor de dijk en de breedte daarvan zijn bepalend voor de respons van de grondwaterstijghoogte bij hoogwater. Het voorland kan onder water lopen bij hoogwater op de rivier en zo de watervoerende laag sterker gaan voeden, zeker als er gaten in de deklaag in het voorland aanwezig zijn (oude stroomgeulen, sloten, ontgroningen en dergelijke). Ook de breedte en de diepte van de rivier zijn belangrijke factoren. Sonarmetingen van RWS van de hoogte van de rivierbodem kunnen hierover belangrijke informatie opleveren. Als de rivier ter plekke diep insnijdt in de ondergrond tot in watervoerende zandlagen, kan er veel voeding van het grondwater optreden bij hoogwater. De aanwezigheid van erosiekuilen achter kribben nabij een schaarlijk in een rivier-buitenbocht verdient daarbij in het bijzonder de aandacht. In het bijzonder dient te worden gelet op erosiegaten bij kribben die door de deklaag gaan! Hierbij dient men bovendien te beseffen dat de riviermorfologie verandert in de tijd. De drainagesystemen met waterontspanners te Jaarsveld, Opijnen en Schoonhovenseveer-Langerak (SLa) liggen in een dergelijke situatie. Bijlage A gaat nader in op onderzoek naar topografische en waterhuishoudkundige informatie.

4.2.1.2 Ondergrondmodellen

Grondwaterstromingsmodellen worden gemaakt aan de hand van een geohydrologische schematisatie, gebaseerd op een ondergrondmodel. Ondergrondmodellen worden vervaardigd op basis van beschikbaar grondonderzoek en fundamentele kennis van de geologie:

- Beschikbaar onderzoek wordt door TNO en andere kennisinstituten verzameld. De verzameling is opgebouwd uit informatie van lokale meetpunten die afhankelijk van het doel waarvoor het onderzoek is uitgevoerd (dijkverbeteringen, bouwprojecten, infrastructurele werken of studieprojecten) zijn geplaatst.
- De fundamentele kennis van de geologie is gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek uitgevoerd door TNO, kennisinstituten en Universiteiten met een faculteit op het gebied van aardwetenschappen.

Een zeer goede indruk van de bodemopbouw van Nederland kan worden verkregen door de website DINO-loket te raadplegen. In Bijlage A is nadere informatie over het DINO-loket uitgewerkt. Het DINO-loket wordt in 2017 opgevolgd door de BRO (Basisregistratie Ondergrond).



4.2.1.3 SOS: Schematisatie van de ondergrond

Het schematiseringsproces van de ondergrond van waterkeringen werd in het verleden in dwars- of langsdoorsneden op deterministische wijze uitgevoerd. Aan onderscheiden grondlagen werden vaste parameterwaarden voor grondmechanische of geohydrologische eigenschappen toegekend. De huidige aanpak volgens WBI2017 beschouwt het ruimtelijke aspect van een dijkstrekking (segment). De ondergrondgegevens worden ruimtelijk weergegeven om inzicht te verkrijgen in ruimtelijke onzekerheden. In vergelijking met deterministisch schematiseren is het proces van schematisering van de ondergrond complexer wanneer het ruimtelijke aspect moet worden meegenomen.

Voor het opstellen van een analyse naar de macrostabiliteit of piping bij primaire waterkeringen is daarom de systematiek van de stochastische ondergrond schematisatie (SOS) ontwikkeld, opgesteld binnen het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b). Hiermee kan informatie over het ruimtelijke aspect en de mogelijke variatie van de bodemopbouw van primaire waterkeringen worden meegenomen. Uitleg over het SOS staat in de Handleiding SOS (Hijma & Lam, 2015). Tevens kan gebruik worden gemaakt van het TR Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012) voor het schematiseren van de ondergrond. Binnen SOS wordt de mogelijke variatie in beeld gebracht door het gebruik van ondergrondscenario's.

Bij Deltares is het programma 'D-Soil Model' ontwikkeld om de ondergrondschematisatie voor de toetsing van primaire waterkeringen te ondersteunen met betrekking tot de toetssporen macrostabiliteit en piping. 'D-Soil Model' maakt onderdeel uit van het Wettelijk Beoordeling Instrumentarium (WBI2017). In het kader van WBI2017 is het ontwerp van ondergrondschematisaties in de gebruikershandleiding voor het programma 'D-Soil Model' beschreven (Deltares, 2016b). 'D-Soil Model' faciliteert de visuele raadpleging van grote hoeveelheden meetgegevens, boringen en sonderingen, uit DINO-loket of een specifieke lokale verzameling van grondonderzoek om daarmee een tweedimensionale schematisatie van de ondergrond te maken. Dit heeft voornamelijk betrekking op de berekening van macrostabiliteit bij diverse ondergrondschematisaties.

Een stochastische ondergrond schematisatie (SOS) is beschikbaar voor primaire waterkeringen (Figuur 4.3). Een SOS bevat de opbouw van de ondergrond gebaseerd op beschikbaar grondonderzoek. Binnen een dijktraject bestaan verschillende scenario's met een opbouw van de ondergrond en een bepaalde kans van voorkomen. De som van de kansen van voorkomen van de verschillende scenario's is gelijk aan '1'. Het aantal scenario's per segment wisselt en hangt af van de lengte van het segment en de complexiteit van de bodemopbouw. In veel gevallen zijn er vier tot acht scenario's toegekend, maar in sommige gevallen zijn grotere aantallen (16 tot 20 scenario's) van toepassing. Met lokaal beschikbare bodemgegevens kan de bodemopbouw verder worden gedetailleerd. Dit past binnen de benadering dat alle mogelijke ondergrondscenario's mee moeten worden genomen bij een beoordeling (WBI 2017).

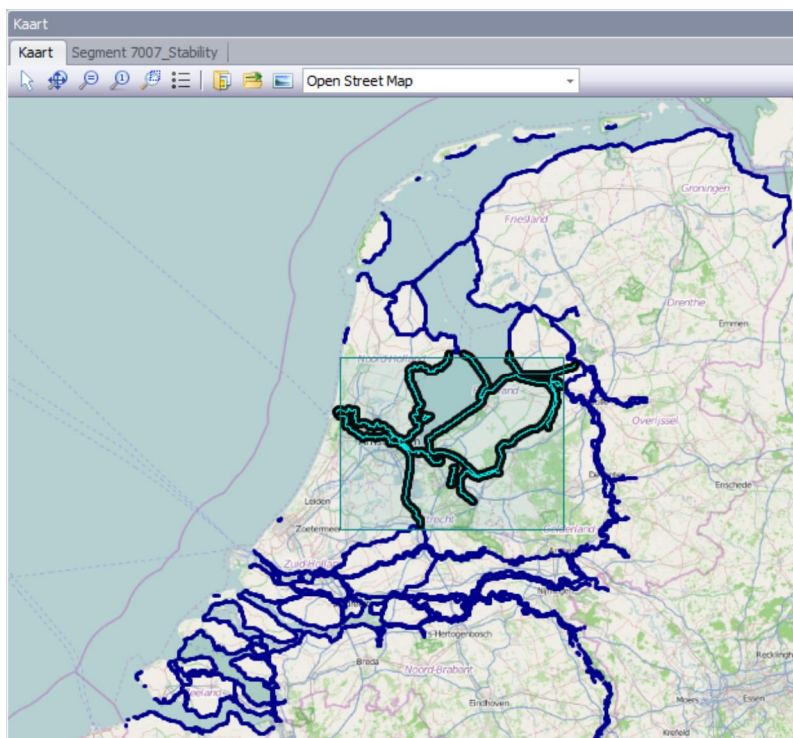
Voor het beoordelen van een faalmechanisme dient deze globale schematisatie als startpunt voor het maken van specifieke, lokale schematisatie van de ondergrond. De SOS zal in veel gevallen aangevuld moeten worden met meer locatie specifieke informatie om tot een goed ondergrondmodel te komen. In Bijlage A is dit nader uitgelegd.

Aanduiding van het dijksmateriaal, eventuele zetting van de ondergrond onder de dijk en lokale verstoringen worden over het algemeen niet meegenomen in de globale scenario's bij een ondergrondmodel, tenzij de historische zetting al in de laagovergangen in de



boorbeschrijvingen tot uitdrukking komt. Tijdens het lokaal schematiseren moeten deze zaken uiteraard wel worden beschouwd en uitgewerkt. De diepteligging moet worden gegeven met een representatieve (modale, meest voorkomende) diepte en indicaties van de minimale en maximale diepteligging van de geologische eenheden. De schematisaties voor de scenario's ter bepaling van dijkveiligheid worden gebruikelijk gemaakt tot een diepte van NAP – 40 m. Voor de dimensionering van geohydrologische ingrepen kunnen dieper reikende schematisaties gewenst zijn, bijvoorbeeld als het watervoerende pakket waarin de bronnen moeten staan, dieper ligt of als een grote invloed wordt verwacht van diepere waterremmende of watervoerende lagen op het geohydrologische systeem. De SOS scenario's voor de categorie a-keringen (primaire waterkeringen) kunnen worden aangevuld met informatie uit VNK2 (Rijkswaterstaat VNK, 2014).

De schematisatie voor de beschouwing van macrostabiliteit of piping van het voorland / de vooroever is niet in de SOS schematiseringshandleiding behandeld. Daarvoor is de 'schematiseringshandleiding afschuiven voorland' (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2016c) beschikbaar. Een overzicht van alle dijksegmenten van primaire keringen waarvoor een SOS ondergrondmodel bestaat, is opgenomen in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Overzicht van alle dijksegmenten van primaire keringen waarvoor een SOS ondergrondmodel bestaat

4.2.2 Informatie over grondwaterstanden en regionale grondwaterstroming

Allereerst is het noodzakelijk om gebiedskennis te verzamelen waarmee een algemeen inzicht kan worden gevormd over de lokale hydrologie. Eigenlijk is het vanzelfsprekend dat de ontwerper ook indrukken moet meenemen over lokale omstandigheden, eventueel afkomstig van dijkbeheerders, zoals met betrekking tot voorkomende kwel en inzinking, optreden van wellen, natte plekken achter waterkeringen of uittredend grondwater uit taluds.

Vervolgens moet de kennis over het grondwater worden verdiept. Grondwaterstanden die zijn gemeten ter plekke van meetpunten uit het landelijk meetnet, zijn te vinden in de database van de Nederlandse ondergrond; het DINO-loket (TNO, 2016). De databank bevat alle



gegevens over grondwater, bijvoorbeeld informatie over de plaats en diepte van meetpunten, administratieve gegevens en resultaten van grondwatermetingen in meetreeksen. Deze metingen zijn gedaan in ongeveer drieëntwintigduizend peilputten. Van veel meetpunten zijn van verschillende filterdiepten standen van het ondiepe (freatische) grondwater of de stijghoogte van het diepe grondwater onder afsluitende bodemlagen op te vragen. Dinoloket wordt in 2017 opgevolgd door de BRO (BRO, 2017).

De frequentie van de waarnemingen is afhankelijk van de beheerder. In het verleden was de waarnemingsfrequentie veelal tweemaal per maand. Sensoren meten de laatste jaren vaak dagelijks. Specifiek voor drainagesystemen zijn waarnemingen van belang tijdens eerdere periodes van hoogwater. Deze informatie maakt het mogelijk om enige karakteristieke grondwaterstanden vast te stellen. Uit lange meetreeksen leidt men de zogenaamde GxG af, de gemiddeld hoogste grondwaterstand GHG (kenmerkend voor het eind van de voorjaarsperiode) en de gemiddeld laagste grondwaterstand GLG (kenmerkend voor het eind van de zomerperiode). Voor de analyse van waterkeringen is het belangrijk om na te gaan of grondwaterstanden geregistreerd zijn in perioden met hoogwater. Tevens is het mogelijk om uit de verzamelde informatie kenmerken van de stroming van het grondwater vast te stellen, ruimtelijke patronen op te stellen en trendmatige veranderingen te analyseren. Belangrijke kenmerken van het grondwater bij de opbouw van een geohydrologisch model zijn bijvoorbeeld de hoogste en de laatste grondwaterstand die in een bepaald gebied zijn te verwachten als gevolg van variatie gedurende het seizoen. Uit deze gegevens kan de seizoensfluctuatie van de grondwaterstand worden afgeleid en een eerste indruk worden verkregen van de mogelijke samenhang met andere hydrologische kenmerken in het modelgebied, zoals de fluctuatie van waterstanden in de rivier. Hoe langer de tijdreeksen zijn, des te nauwkeuriger de voorspellingen kunnen zijn over het lange termijn gedrag van het grondwater.

Bij het uitvoeren van een analyse van de grondwaterstroming kan het globale regionale patroon van grondwaterstanden en stijghoogten het vertrekpunt vormen. De aandacht gaat echter uit naar de verandering van de stroming nabij de dijk onder invloed van hoogwater. Patronen van grondwaterstroming zijn in de nationale database echter niet direct te vinden. Na het opvragen van data van meetpunten, kunnen met GIS eventueel kaarten worden gepresenteerd. Deze informatie stond vroeger in de grondwaterkaarten van TNO waar patronen van grondwaterstanden of stijghoogten van het jaargemiddelde, winter of zomerseizoen waren weergegeven. Dergelijke kaarten zijn veelal vervangen door de presentatie van grondwaterinformatie op web portals van provincies, waterschappen of gemeenten.

Voor getijdegebieden zijn de meetgegevens uit DINO veelal niet voldoende. Historische data moeten worden aangevuld met lokale metingen van de reactie van het grondwater op het getij.

4.2.3 Detailleren van de ondergrondschematisatie

4.2.3.1 Iteratief proces in relatie tot nauwkeurigheid

Ondergrondschematisaties voor geohydrologische modellen worden veelal gebaseerd op puntinformatie maar beschikbare meetpunten of boringen liggen vaak ver uit elkaar. Voor beschikbare regionale ondergrondmodellen van TNO heeft er bij de samenstelling een goed onderbouwde interpolatie tussen de meetpunten en boringen plaats gevonden op basis van kennis en inzicht van geologische experts. Een ijking op basis van een regionaal model zal desalniettemin het globale geohydrologische beeld van een regio weergeven. Juist door het



uitvoeren van lokale metingen kan worden afgeleid of de grondwaterstroming in de situatie ter plekke van de waterkering afwijkt van het conceptuele model, wat moet leiden tot andere inzichten. Een voorbeeld is wanneer in het achterland lokaal opdrijven van een kleilaag plaatsvindt, waardoor de elastische berging anders uitvalt dan verwacht. Een ander voorbeeld is wanneer de hydraulische weerstand van de toplaag op lokale schaal een andere waarde heeft, dan op regionale schaal.

De verbetering van een globaal geohydrologisch model naar een specifiek lokaal model door het uitvoeren van grondonderzoek is een iteratief proces. Detaillering van de informatie over de ondergrond is essentieel in het ontwerp van een drainagesysteem. Het grondonderzoek kan leiden tot nieuwe kennis van de ondergrond in het gebied waardoor in een vervolgstap uitgebreider onderzoek moet worden ingezet.

4.2.3.2 *Toevoegen van lokaal grondonderzoek*

Het grondonderzoek dat nodig is om de benodigde invoer voor het geohydrologische model op te kunnen baseren, moet worden afgestemd op de variatie van de bodemopbouw die door een geoloog wordt verwacht volgens zijn kennis van de correlatieafstanden van lokale geologische verschijnselen (bijvoorbeeld de breedte van geulinsnijdingen, verbreiding van kleilagen en dergelijke).

Lokaal grondonderzoek in en rond waterkeringen zal vaak starten met de uitvoering van boringen en sonderingen. Daarnaast kunnen bijzondere onderzoeksmethoden worden ingezet, zoals geofysische methoden.

De beschrijving van de methoden voor grondonderzoek die kunnen worden toegepast ten behoeve van geohydrologische modelvorming is opgenomen in paragraaf 4.3.

Bij het grondonderzoek moeten ook meetinstrumenten ter bepaling van grondwaterstanden worden geplaatst. Bij dijken in het gebied van de bovenrivieren is de variatie van waterstanden in de rivier vooral afhankelijk van het seizoen als gevolg van optredende afvoergolven door omvangrijke neerslag of sneeuwsmelt in het stroomgebied. Om de effecten van hoogwater op de stijghoogte onder een waterkering of in het achterland te bepalen, zullen peilbuizen in raaien moeten worden bemeaten over een langere meetperiode. Methoden om waterspanningen en stijghoogten te meten en de metingen te analyseren zijn beschreven in het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (ENW, 2004).

De lokaal geldende geohydrologische eigenschappen van bodemlagen worden bepaald met bijzondere veldproeven.

4.2.4 Bepalen van doorlatendheden

In verschillende handboeken en classificatiesystemen is een relatie tussen grondbeschrijving en doorlatendheid gegeven met een mogelijke marge. Doorlatendheden van bodemlagen kunnen vanwege de aard en samenstelling van de aanwezige grond sterk uiteen lopen.

De volgende tabel met grondsoorten en doorlatendheden (Lunne, Robertson, & Powell, 1997) geeft een indruk van de mogelijke spreiding in de doorlatendheid per grondsoort.



Type	Grondsoort	Doorlatendheid minimum [m/d]	Doorlatendheid maximum [m/d]
1	Fijnkorrelig, verwekingsgevoelig	0,000005	0,0005
2	Organisch materiaal (veen)	0,002	0,5
3	Klei	0,00001	0,0001
4	Silthoudende klei tot klei	0,0001	0,001
5	Kleig silt tot silthoudende klei	0,001	0,01
6	Zandig silt tot kleig silt	0,01	0,1
7	Silthoudend zand tot zandig silt	0,1	1
8	Zand (zeer fijn) tot silthoudend zand	1	10
9	Zand (middelfijn tot grof)	10	100
10	Zand tot grind	100	1000
11	Zeer stijf fijn korrelig materiaal	0,000005	0,005
12	Zand tot kleig zand	0,0005	1

Tabel 4.1 Doorlatendheid als functie van de grondsoort, indeling volgens Robertson

Vanwege de mogelijke spreiding moet de in een model in te voeren waarde voor de doorlatendheid in een model liefst niet alleen volgen uit beschikbare informatie en proefverzamelingen, maar ook worden aangevuld met resultaten van laboratoriumtesten en lokale veldproeven. De doorlatendheidseigenschappen van de bodem kunnen op verschillende manieren met proeven worden bepaald. In volgorde van afnemende schaal en kosten zijn de mogelijke methoden:

- Waterbalansstudies.
- Pompproeven of proefbemalingen.
- Getijdeanalyses.
- Putproeven.
- Peilbuistesten.
- Laboratoriumproeven.
- In-situ sondetechnieken.
- Correlaties met beschrijvingen van boorresultaten of sonderingen.

De beschrijving van de vermelde methoden voor grondonderzoek is opgenomen in paragraaf 4.3. Voor algemene aanwijzingen bij de vermelde bepalingsmethoden voor doorlatendheden wordt verwezen naar de verschillende handboeken:

- Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek, van planfase tot realisatie (CUR247, 2013).
- Leidraad riolering, Module C2510, Doorlatendheidsonderzoek voor infiltratie en drainage (RIONED, 2015).



Een onderzoekpakket kan bijvoorbeeld bestaan uit:

- Een vooronderzoek op basis van beschikbare geohydrologische data en terreingegevens, het plaatsen van enkele raaien met peilbuizen voor een analyse van de dynamiek van het grondwater onder invloed van variërend peil van het buitenwater.
- Een nader onderzoek op basis van enkele boringen en sonderingen met eventueel een pompproef.
- Een detailonderzoek voor uitvoering op basis van een sondering per bron en enkele putproeven.

4.2.4.1 Waterbalansstudie

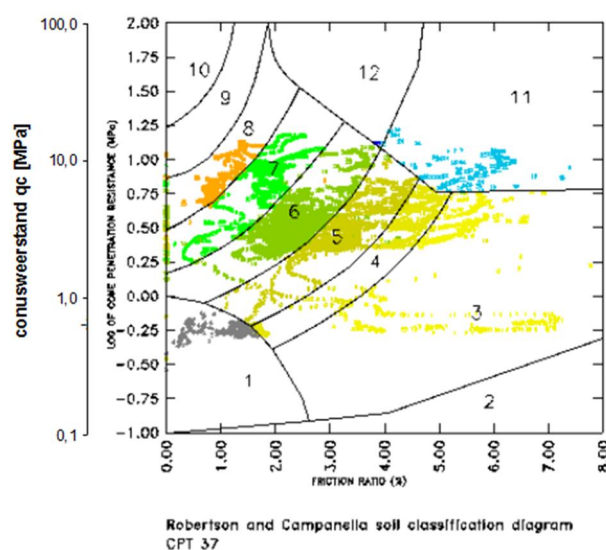
Bij een waterbalansstudie wordt aan de hand van de vaststelling van de fluxen van ingaand en uitgeslagen water uit een begrensd gebied (bijvoorbeeld een polder) de gemiddelde hydraulische weerstand van de toplaag bepaald. Wanneer bovendien grondwaterstanden in peilbuizen in en rond het gebied worden bepaald, worden aan de hand van stijghoogteverschillen de stroming en de gemiddelde doorlatendheid van watervoerende bodemlagen worden geëvalueerd. Hiervoor is wel een uitvoerige verzameling van data en een bureaustudie nodig. Met behulp van grondwatermodellen kan de evaluatie van geohydrologische eigenschappen ook door middel van een modelkalibratie worden gedaan.

4.2.4.2 Veld- en laboratoriumproeven

Het uitvoeren van grondonderzoek levert de verschillende eigenschappen op. Een beschrijving van de verschillende proeven is opgenomen in paragraaf 4.3.

4.2.4.3 Boringen en sonderingen en correlaties van doorlatendheid met die metingen

De doorlatendheid kan ook worden bepaald uit correlatie met gemeten sondeerwaarden. Bij een dergelijke correlatie wordt gebruik gemaakt van een classificatiesysteem (Lunne, Robertson, & Powell, 1997). Een voorbeeld van de daaruit voortgekomen correlatiegrafiek voor de doorlatendheid gebaseerd op sonderingen staat weergegeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Diagram met een bodemclassificatie, ontleend aan (Lunne, Robertson, & Powell, 1997)

4.2.4.4 Nauwkeurigheid van correlatiemethoden

De indeling van grondlagen op basis van lithologie naar aanleiding van veldbeschrijvingen, vooral de beoordeling van het voorkomen van lemige en kleiige zandlagen, blijkt bij het



opstellen van een conceptuele modelbeschrijving vrij lastig te zijn. Op basis van lithologische klassering van grondlagen kunnen met kennis uit proefverzamelingen de doorlatendheden van die grondlagen worden afgeleid. Het is bekend dat de spreiding in doorlatendheden vooral voor cohesieve gronden erg groot is. Het is daarom aan te bevelen om de opzet van ondergrondmodellen aan ervaren geo(hydro)logen over te laten.

Gezien de uiteenzetting over mogelijke onzekerheden, moeten de resultaten van doorlatendheidsbepalingen niet als 'exact' beschouwd worden, maar als één mogelijke uitkomst uit vele scenario's. Een degelijke foutenanalyse is nodig om één modelresultaat in de context te plaatsen: informatie over de mogelijke ranges van uitkomsten is daarbij van groot belang. Bovendien kan het identificeren van de attributen die de grootste bijdragen aan de fouten leveren, leiden tot verbeteringen in modelstructuren.

4.2.5 Berging van grondwater in de bodem

In een dijk zal water worden geborgen bij het stijgen van de grondwaterspiegel (freatische berging). Deze freatische berging is in de orde van grootte van de porositeit.

In slappe grondlagen wordt bij dalende druk water uitgedreven uit de poriënruimte als gevolg van gronddeformatie (consolidatie) en in een zandlaag zal door (verticale) compactie ook bergingsverandering optreden. Bij stijgende druk ontstaat zwel van lagen en rijzing van het maaiveld. De bergingsverandering van spanningswater wordt uitgedrukt met de bergingscoëfficiënt. De grootte van deze coëfficiënt is afhankelijk van de samendrukbaarheid van de korrelmatrix van de grondlaag en hangt dus samen met grondmechanische eigenschappen. Afhankelijk van materiaal, laagdikte, diepte en spanningsniveau ligt de grootte van de bergingscoëfficiënt tussen $1 \cdot 10^{-2}$ en $1 \cdot 10^{-4}$ [-].

Berging leidt ertoe dat effecten van grondwaterbeweging worden vertraagd en eventueel uitdempen. In principe is dit een tijdsafhankelijk proces dat bestaat omdat de belasting zelf tijdsafhankelijk is (hoogwater) of geleidelijk ontstaat (dijkversterking, bodemdaling). Het aspect berging kan van belang zijn bij het ontwerp van een drainagesysteem omdat hiermee wordt vastgelegd hoe traag het grondwatersysteem reageert op verandering van het rivierpeil. Als er sprake is van een grondwatersysteem met spanningswater in zandlagen onder een kleidek, is de bergingscoëfficiënt klein en zal het systeem vrij snel reageren. De bergingscoëfficiënt kan worden bepaald door pompproeven uit te voeren.

4.2.6 Rivierbodem en voorland

Een grote invloed van hoogwater op de respons van de grondwaterstijghoogte wordt bepaald door de afstand van de riviergeul tot de waterkering. De hydraulische weerstand van de toplaag van de uiterwaard tijdens maatgevend hoogwater is eveneens van grote invloed op de respons van het grondwater. Uit metingen van het verloop van grondwaterstanden in meetraaien kan worden nagegaan in hoeverre de hydraulische weerstand van het voorland een rol speelt in de reactie van het grondwater bij hoogwater op de rivier (Phernambucq, 2015).

Van een mogelijke toename van de invloed van hoogwater in de rivier op de grondwaterstand is sprake wanneer de slielagen op de bodem van de rivier bij een hoge rivierafvoer eroderen waardoor de intree weerstand van de rivierbodem wordt weggenomen (zoals onder kolken bij kribben).

4.2.7 Onttrekkingen van grondwater

Op veel plekken langs de grote rivieren liggen grondwateronttrekkingen van drinkwatermaatschappijen of van industrieën. Het optreden van effecten door onttrekkingen



van grondwater is een complicerende factor bij het uitwerken van grondwatermetingen in meetraaien voor het geohydrologisch onderzoek. Rond de onttrekkingen treden verlagingen op van de grondwaterstand die het verloop in een meetraai kunnen beïnvloeden. Waar dit het geval is, moet de omvang van het invloedsgebied van de onttrekking en de mogelijke variatie van de onttrekking in kaart worden gebracht, zodat hiermee rekening kan worden gehouden bij de uitvoering en uitwerking van metingen.

De ontwerper van een drainagesysteem zal bedacht moeten zijn op het beëindigen van aanwezige onttrekkingen in de omgeving, want dat kan de grondwaterstroming in de nabijheid van een drainagesysteem in sterke mate beïnvloeden. Het fictief 'uitzetten' van een aanwezige drinkwaterwinning in het grondwatermodel geeft inzicht in de gevoeligheid en de mate van beïnvloeding van de drinkwaterwinning op de waterkering tijdens hoogwater. Het is realistisch om daarbij uit te gaan van een gemiddelde onttrekking, zoals gebleken is bij de toepassing van een drainagetechniek op twee locaties binnen het beheersgebied van waterschap Rivierenland.

Het waterschap zal de onttrekking van grondwater met een drainagesysteem beoordelen met het oog op vergunningverlening volgens de Waterwet. De onttrekking van grondwater die in het kader van een aan te vragen vergunning wordt gemeld, moet betrekking hebben op de benodigde maximale capaciteit in de (nabije) toekomst. Dit is nodig om de juiste informatie te verschaffen omtrent het te verwachten maatgevend gebruik per etmaal. De grondwatermodellering zal de benodigde informatie moeten kunnen opleveren.

4.2.8 Schaalproblematiek

Bij het kiezen van doorlatendheden voor een model wordt de onderzoeker geconfronteerd met het probleem van het schalen van metingen naar het model. In het laboratorium kunnen doorlatendheidsproeven worden gedaan met cohesieve grondmonsters, zoals klei en veen. Ook doorlatendheidsmetingen die in het geotechnisch laboratorium zijn uitgevoerd, zijn puntwaarnemingen in een op te zetten geohydrologisch model ten behoeve van het ontwerp. Deze doorlatendheidsmetingen hebben vaak een beperkte waarde want er moet rekening worden gehouden met het feit dat het pure beproefde materiaal verstoord kan zijn met ander materiaal (zand in klei bijvoorbeeld).

Een monster uit een boring waarvan de doorlatendheid wordt gemeten is altijd veel kleiner dan de omvang van het te modelleren gebied of de kleinste cel of eenheid in dat model. Dit houdt in dat bij beperkte informatie een sterke interpolatie nodig is om delen van het model waar geen proefresultaten beschikbaar zijn te vullen met parameterwaarden. Als de bodem in een celblok niet homogeen is (en meestal is dat het geval) dan is één meting in principe onvoldoende. Bovendien moet informatie over aspecten als isotropie en homogeniteit (zie hierna) worden meegewogen bij de vertaalslag van puntmeting naar representatieve doorlatendheidswaarde. Het andere uiterste in het schaalprobleem is aanwezig bij het gebruik van pompproeven. De interpretatie van dergelijke proeven leidt tot een globaal of regionaal beeld van de doorlatendheid. Bij de beoordeling van pompproeven zal een afweging moeten worden gemaakt welk effect samenhangt met de heterogeniteit in de bodemlagen (bijvoorbeeld vanwege voorkomen van zandige banen in kleilagen of grind in zandlagen).

Door Deltares worden regionale geohydrologische modellen ontwikkeld en onderhouden voor onder meer de waterschappen. Deze zijn gebaseerd op geologische modellen van TNO waar geostatistische methoden worden toegepast voor het modelleren en karakteriseren van de bodemvariabiliteit, en ook voor het opschalen en voorspellen van de doorlatendheid. Door



inbreng van geologische kennis wordt zo goed mogelijk rekening gehouden met ruimtelijke structuren in de ondergrond.

4.2.9 Heterogeniteit en anisotropie i.r.t. drainagetechnieken.

Onder isotropie wordt verstaan, dat de doorlatendheid in alle richtingen gelijk is ($k_x = k_y = k_z$). Zand is echter over het algemeen geen isotroop materiaal. Als gevolg van de afzettingwijze van een laag (opwaaiing, afzetting in stroomgordels, bezinking in een estuarium en dergelijke) kan de doorlatendheid in de horizontale richting sterk verschillen van de doorlatendheid in de verticale richting of de doorlatendheid in de lengterichting sterk verschillen van die in laterale richting. Ook veen- en kleilagen kunnen in sterke mate anisotroop zijn vanwege het afzettingsmilieu tijdens het ontstaan. Iedere veensoort (veenmos, rietveen, zeggeveen en dergelijke) kent bijvoorbeeld een eigen structuur.

Ook de samendrukking onder het gewicht van bovenliggende bodemlagen kan gezorgd hebben voor een sterke gelaagdheid. Dergelijke informatie wordt niet weergegeven in DINO-loket en de ondergrondmodellen van DINO-loket.

Het voorkomen en de mate van anisotropie moet worden afgeleid uit geologische kennis over de lokale afzettingen en kan worden afgeleid uit boringen. Mogelijk kunnen ook kleinschalige pompproeven hier uitsluitsel over geven.

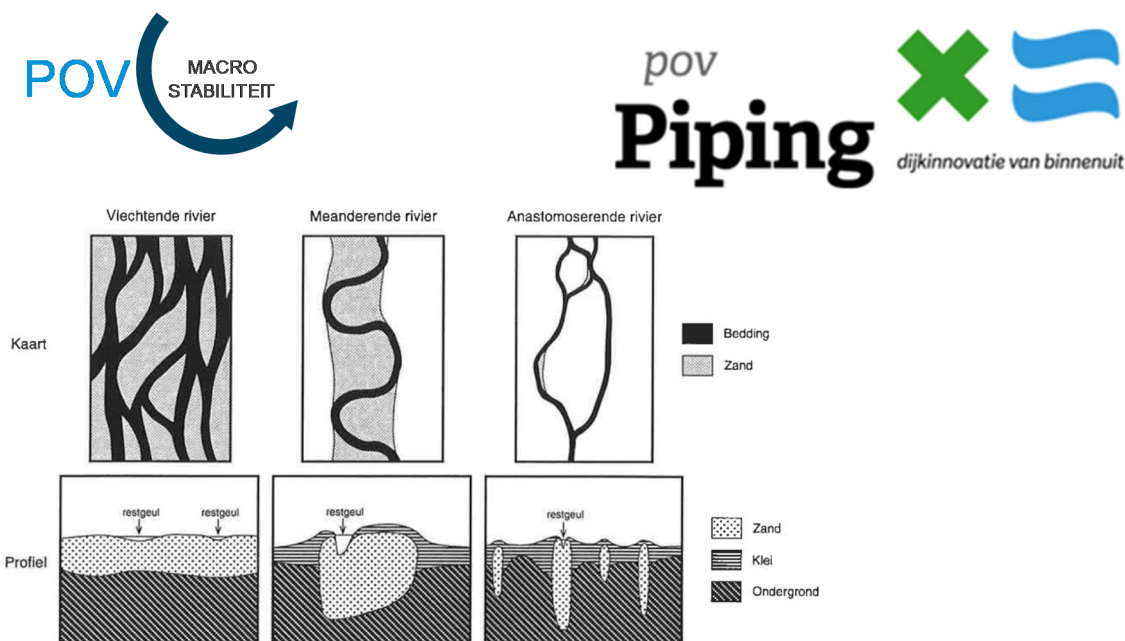
In de modellering kan anisotropie worden meegenomen door middel van een anisotropiefactor, maar dit is dan geheel naar het inzicht van de modelleur. Een mogelijke keuze voor de anisotropiefactor k_h/k_v op basis van geologische kennis over de gelaagdheid van een afzetting of de waarneming aan de hand van boorresultaten is hierna aangegeven. De interpretatie is opgesteld voor klei door (Baligh & Levadoux, 1980), maar gaat globaal ook wel op voor zand:

Waarneming	k_h/k_v
Geen bewijs van gelaagdheid	1 à 1,5
Beperkte gelaagdheid (bijvoorbeeld klei met dunne silt laagjes)	2 à 5
Sterke gelaagdheid (bijvoorbeeld wadzandafzettingen en smeltwaterafzettingen van gletsjers)	5 à 15

Tabel 4.2 De interpretatie voor de anisotropiefactor

Onder homogeniteit wordt verstaan, dat in het te beschouwen gebied de waarde van de coëfficiënten voor de doorlatendheid overal gelijk is. Heterogeniteit is het voorkomen van alle omstandigheden die leiden tot grote verschillen in doorlatendheid in de bodem: afwisseling van diverse grondsoorten in een bodemlaag, verschillen in gradering (grof – fijn), gelaagdheid in de afzetting (door afzetting of stuwning).

Heterogeniteiten zijn bijvoorbeeld in kleilagen aanwezig als deze doorsneden zijn door zandige afzettingen van oude stroomgeulen van rivieren of beken. Wat het optreden van heterogeniteit betreft, is het goed dat men zich bewust is van de geologische processen die bij deltavorming een rol spelen. Als men wil weten waar stroombanen voorkomen, kan men zich verdiepen in de ontstaanswijze (Berendsen, 2004). De mate van heterogeniteit van de doorlatendheid hangt sterk af van de schaal waarop deze wordt beschouwd.



Figuur 4.5 Ruimtelijk patroon van vlechtende, meanderende en anastomoserende rivieren en schematische doorsnede van de afzettingen van deze riviertypen

Ook voor het ontwerp van drainagesystemen langs rivierdijken is deze kennis van belang. Bijvoorbeeld, als gevolg van de aanwezigheid van zandbanen is een deklaag beslist niet 'waterdicht'. Vooral in gebieden waar meanderende rivieren gedurende het Holoceen actief zijn geweest, kunnen zandbanen voorkomen die in verbinding staan met de pleistocene ondergrond en tot dicht aan het oppervlak doorlopen.

Informatie over inhomogeniteiten zal men in de praktijk moeten afleiden uit boor- en sondeercampagnes, eventueel aangevuld met geofysisch onderzoek.

4.2.10 Metingen na plaatsing van een drainagesysteem

Grondwateronderzoek dient geen eenmalige actie te zijn om informatie te leveren waarmee een geohydrologisch model wordt geijkt maar zal ook moeten worden doorgezet in de monitoringsfase. Want ook als het ondergrondmodel al is opgesteld, kan het nodig zijn om door te gaan met de uitvoering van metingen. Dit wordt aangeraden omdat extreme buitenwaterstanden niet vaak voorkomen, zodat het van belang is dat een waterschap op enkele plekken nabij een drainagesysteem door middel van monitoring meetreeksen verzamelt waarmee wordt geverifieerd of een in een ontwerp geëxtrapoleerd of voorspeld grondwaterverloop daadwerkelijk optreedt. Hierbij dient adequate aandacht te worden besteed aan de nauwkeurigheid, de betrouwbaarheid en de controleerbaarheid van de metingen. Dergelijke informatie is bruikbaar voor toekomstige toetsingen, en bij de beoordeling of een gerealiseerd drainagesysteem moet worden uitgebreid of anderszins aangepast.

Monitoring is noodzakelijk in dijkvakken in de waterkering waar bekend is dat de grondwaterstijging een negatieve impact heeft op de stabiliteit van de waterkering. Bovendien is monitoring noodzakelijk in dijkvakken waar door de realisatie van een maatregel om de stabiliteit te verbeteren een ingreep in het grondwatersysteem wordt gedaan door aanleg van een drainagetechniek. De monitoring dient dan om vast te stellen of de ingreep de beoogde beheersing van de grondwaterstand realiseert. Indien na realisatie nog onzekerheden bestaan over de maximale grondwaterverlaging die met een drainagesysteem kan worden behaald, is het relevant om te controleren of een tijdige inzet van noodbemalingspompen nodig is. De inzet van een pomp is aan de orde, indien monitoring een overschrijding van een stijghoogtelimiet tussen twee bronnen aangeeft.



4.3 Uitvoering van grondonderzoek

4.3.1 Voorschriften voor uitvoering

In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (2001) is beschreven welke terrein- en laboratoriumproeven bestaan en welke proeven zich lenen voor het bepalen van de verschillende grondkarakteristieken. Ook in CUR-rapport162 (Construeren met grond) zijn onderzoekstechnieken beschreven. Met betrekking tot waterstanden en waterspanningen zijn in de TRWG richtlijnen voor de uitvoering van onderzoeken aangegeven, met verwijzing voor verdieping van kennis naar het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (2004).

Voor de wijze waarop boringen en sonderingen moeten worden uitgevoerd zijn protocollen beschikbaar. Voor sonderingen zijn dat de protocollen:

- NEN-EN-ISO 22476-1 Elektrisch sonderen (NEN, 2013).
- Correctieblad C1 (2012/2013).

Voor de toepassing van correlaties voor het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte met behulp van sondeerresultaten in dijkprojecten is een aanvulling gemaakt op het bovenstaande protocol (Stoevelaar, R., van Duinen, A., 2016).

Voor de uitvoering van boringen en de wijze van grondbeschrijving worden de volgende normen en protocollen vermeld:

- NEN-EN-ISO 22475-1/C11, Geotechnisch onderzoek en beproeving - Methoden voor monsterneming en grondwatermeting - Deel 1: Technische grondslagen voor de uitvoering (NEN, 2010).
- NEN-EN-ISO 14688-1, Identificatie en classificatie van grond (vervangt NEN 5104).
- BRL SIKB 2100, Beoordelingsrichtlijn mechanisch boren.

Bij boormethoden wordt onderscheid gemaakt in de drie categorieën A, B en C, waarbij categorie A de hoogst haalbare is. De norm NEN-EN-ISO 22475-1/C11 geeft een beschrijving van de categorieën. De indeling van de categorieën is niet alleen afhankelijk van de boormethode, maar ook van de grondsoort. Bij het nemen van zandmonsters is het van belang om de doorlatendheid uit korrelverdelingen te kunnen bepalen met zevingen in het laboratorium. Pulsboringen zijn veelal het meest geschikt. Voor stijve klei zijn er aanzienlijk meer methoden, die vallen in categorie A, geschikt voor het steken van een monsters van kwaliteitsklasse 1 of 2, dan voor organische grond. Overigens geeft de norm alleen aan welke kwaliteitsklasse met welke categorie steekapparaat haalbaar is.

Voor het plannen van onderzoekspunten is het belangrijk om eerst historisch kaartmateriaal te raadplegen. De grootste afstand tussen de boringen en/of sonderingen is 250 m. Volgens NEN 9997-1 (bladzijde 69, paragraaf 3.2.3c) moet bij geotechnisch onderzoek in de geotechnische categorieën 2 en 3 voor grondwerken en grondkerende constructies, indien op basis van de geologische kennis van het gebied wordt verwacht dat afwijkingen in dikte van aanwezige klei-, veen- en leemlagen op het bouwterrein kleiner zijn dan 0,5 m (waardoor geen zakkingsverschillen groter dan 0,10 m over een afstand van 10 m zullen optreden) de afstand tussen de punten van onderzoek ten hoogste 100 m zijn. Als zakkingsverschillen van 0,10 m of meer over een afstand van 10 m kunnen leiden tot overstroming van dijken of dammen of tot enig gevaar voor de gebruikers van wegen en spoorwegen, moet de afstand tussen de onderzoekspunten worden verkleind tot ten hoogste 50 m. Het geotechnisch



onderzoek moet reiken tot de onderkant van de laag die zakkingen of stabiliteitsverlies kan veroorzaken.

4.3.2 Onderzoek van grondwaterstanden en stijghoogten

Bij grondmechanische analyse van de stabiliteit van een waterkering moet de benodigde aanpassing van de stijghoogte worden afgeleid waarvoor een drainagesysteem kan worden ingezet. Om een drainagesysteem te kunnen ontwerpen zal daarom eerst de lokale verdeling van de grondwaterstand en de stijghoogten in beeld moeten worden gebracht.

Indien een laag voorkomt met freatisch grondwater – dit is grondwater net onder maaiveld dat onderhevig is aan de atmosferische druk – spreekt men van de grondwaterstand in die laag. Indien het grondwater voorkomt in een watervoerende laag onder een afdekkende en waterremmende laag, spreekt men van grondwater onder druk (spanningswater) waardoor in een peilbuis een zekere stijghoogte ontstaat in overeenstemming met de heersende waterdruk (of waterspanning).

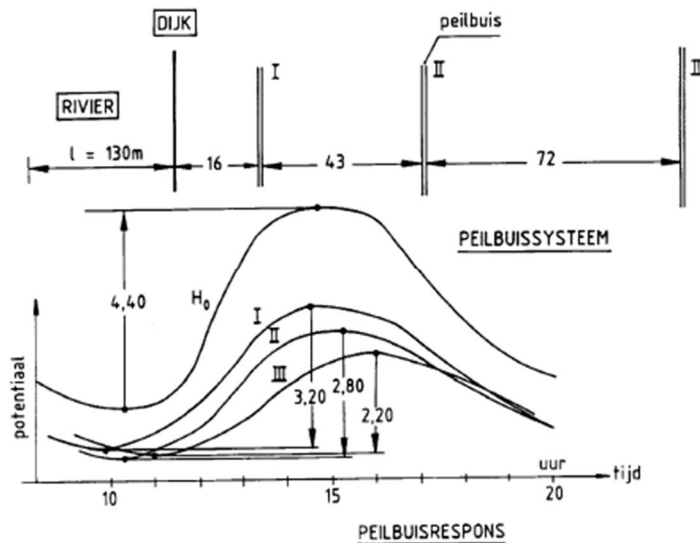
De waarnemingsfilters van te plaatsen peilbuizen moeten op de diepte worden geplaatst waar watervoerende lagen voorkomen en waar een grote variatie van de grondwaterstand kan optreden als gevolg van een stijging van de waterstand in de rivier. Bij het zetten van de boringen ten behoeve van het plaatsen van de peilbuizen, moet worden nagegaan of er tussenzandlagen voorkomen.

4.3.2.1 Plaatsen van peilbuizen of waterspanningsmeters

Voor het onderzoek naar de ruimtelijke verdeling van grondwaterstijghoogten en de lokale stroming van het grondwater ter plaatse van een waterkering worden metingen met peilbuizen naar de stijghoogte uitgevoerd (volgens NEN-EN-ISO 22475-1/C11) of metingen verricht met waterspanningsmeters naar de waterspanning.

Indien de bodemopbouw van dijkvakken bekend is, zullen op verwachte kritische locaties metingen worden gedaan naar de grondwaterstand, de waterspanning en de stijghoogten met waterspanningsmeters en peilbuizen. Ook het vaststellen van een verandering van de grondwaterstand ten gevolge van wisselende buitenwaterstanden is nodig.

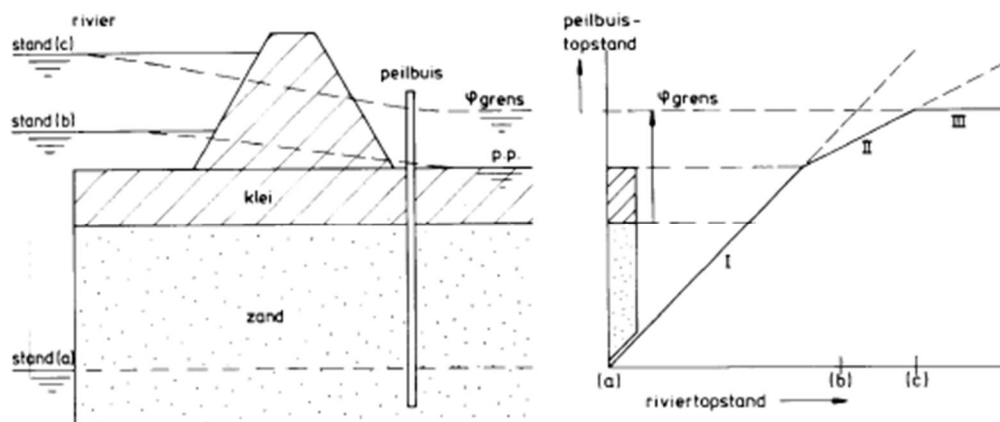
Per onderscheiden dijkvak waarvoor een zekere schematisatie geldt, wordt aanbevolen om meetraaien met peilbuizen te plaatsen. Het aantal raaien zal meestal minimaal 1 per kilometer, 1 per dijkvak of meer zijn als er lokale geologische verschijnselen voorkomen die van invloed zijn op de schematisering van toplagen of waterremmende lagen. Per meetraai dienen minimaal drie peilbuislocaties te worden ingericht: een locatie nabij de kruinlijn, een locatie in het achterland nabij de binnenteen en een locatie in het voorland of nabij de buitenteen (Figuur 4.6). Is er sprake van een breed voorland of van een ver reikend effect in het achterland, dan is het verstandig om peilbuizen op grotere afstand van de waterkering in de raai mee te nemen. Op basis van een globale schatting van de geohydrologische eigenschappen van de bodemlagen volgens de lokale schematisatie, kan worden voorspeld welke variatie in grondwaterstijghoogten is te verwachten in de raai dwars op de waterkering bij een optredend hoogwater op de rivier. De plaatsing van peilbuizen kan op een dergelijke predictie worden afgestemd.



Figuur 4.6 Gemeten hoogwater in een dijakraai met voorland (Bauduin & Barends, 1988)

Bij dijkvakken van benedenrivieren waar de buitenwaterstand onderhevig is aan getij kunnen met peilbuizen in een meetraai 13-uursmetingen worden uitgevoerd om de doorwerking van het getij in de stijghoogte op verschillende afstanden van de rivier vast te stellen. Het is mogelijk om daaruit geohydrologische parameterwaarden af te leiden (TAW, 1989).

Uit de relatie tussen de waterstand in de rivier en de lokale grondwaterstijghoogte kan het niet-stationaire gedrag van het grondwater ter plaatse van de waterkering worden afgeleid. De metingen kunnen aangeven of er een lineair verband bestaat dan wel een niet-lineair verband (bijvoorbeeld door inundatie van het voorland, andere systeemveranderingen of door opdrukken van de kleilaag in het achterland bij het bereiken van de grenspotential). Als het verband bekend is, kunnen de grondwaterstanden ter plaatse van de waterkering worden afgeleid aan de hand van de statistische verdeling van verwachte waterstanden met bijbehorende overschrijdingskansen voor het optreden van hoogwatergolven op de rivier (Figuur 4.7).



Figuur 4.7 Extrapolatie van extreme stijghoogte uit momentane standen (TRW)

Voor het uitvoeren van bovenstaande analyse is een vereiste dat binnen de waarnemingsperiode een hoogwater voorkomt waarbij het voorland volledig inundeert. Als

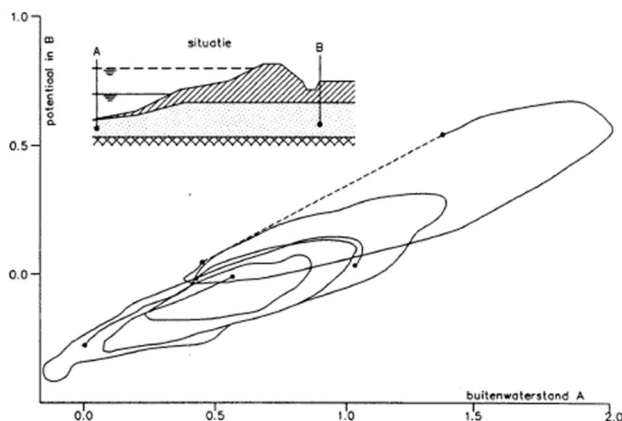


deze situatie zich niet voordoet, dan moet het effect van inundatie op de stijghoogte worden beschouwd, waarbij rekening moet worden gehouden met een extra onzekerheid.

Met grondwatermetingen kunnen bovendien de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond worden afgeleid. Uit het verloop van de stijghoogte over de waterkering in de watervoerende laag kan de grootte van de lekfactor in voorland en achterland worden bepaald. De lekfactor is:

$$\lambda = \sqrt{(kD \cdot c)} \quad (4.1)$$

Een afleiding van de afzonderlijke parameterwaarden kan zeker worden uitgevoerd als sprake is van een getij, of van een variatie van de waterstand door een passerende hoogwatergolf (Figuur 4.8). Uit de mate van demping en het faseverschil kunnen de parameterwaarden worden berekend volgens beschikbare analytische formules. Deze formules zijn te vinden in de bijlagen van de TRW (ENW, 2004). De weerstand van de deklagen die uit de lekfactor kan worden afgeleid, is bepalend voor de ontwikkeling van de stijghoogte achter de dijk. Omdat de weerstand meestal vrij groot is, reageert spanningswater vrijwel instantaan op de ontwikkeling van het waterniveau op de rivier. Het doorlaatvermogen van de watervoerende laag bepaalt het debiet van het drainagesysteem in sterke mate.



Figuur 4.8 Getijderespons in een peilbuis op getij in een rivier gedurende een aantal etmalen

Voor de kustgebieden (zoals Zeeland) wordt geadviseerd om minimaal een maand door te meten om een goede analyse te kunnen uitvoeren. Dan kan het meetsignaal gesplitst worden in een statisch deel, een quasi-stationair deel en een dynamisch deel. Voor de analyse van het statische deel wordt het lopend gemiddelde van 3 dagen aangehouden. Een periode van 2 maanden is toereikend om vooral de quasi-statische component te kunnen vaststellen (voldoende variatie van deze waterstand).

4.3.3 Veldproeven

4.3.3.1 Pompproeven

Resultaten van pompproeven geven de beste voorspelling van de gemiddelde doorlatendheid in een regio. De invloed van een onttrekking op de omgeving en de capaciteit van een put kunnen dan het beste worden geschat. Pompproefresultaten zijn in het verleden verricht door rijksdiensten en drinkwaterbedrijven en deze waarnemingen zijn nu overgebracht naar het archief van TNO. De verzamelde resultaten staan vermeld in oude grondwaterkaarten van



TNO en soms in provinciale grondwaterplannen. De dichtheid van de locaties waar pompproeven zijn uitgevoerd, is niet erg groot.

Wanneer te weinig informatie beschikbaar is over het regionale beeld van geohydrologische parameters, zullen aanvullende pompproeven moeten worden uitgevoerd. Deze proeven zijn vrij kostbaar en vragen om een zorgvuldige voorbereiding om een put en benodigde waarnemingsfilters op de juiste plek aan te brengen. Deze voorzieningen kunnen wellicht worden opgenomen in het uiteindelijke ontwerp van het drainagesysteem. De boorwerkzaamheden, de monitoring en een goede uitwerking zijn daarom relatief kostbaar. Door tijdens het onttrekken van grondwater aan de bron, het debiet en de verlagingen in de meetpunten vast te leggen, kunnen de geohydrologische eigenschappen worden afgeleid zoals het doorlaatvermogen van watervoerende lagen en de hydraulische weerstand van waterremmende lagen, evenals de bergingscoëfficiënten van de verschillende lagen. De norm waar dergelijke proeven aan moeten voldoen is “prEN-ISO-DIS 22282-2 en -6 pumping tests” (ISO, 2012c).

4.3.3.2 *Getijdeanalyses*

Tijdens vallende of stijgende rivierstand, bijvoorbeeld onder invloed van getij, kan langs de rivieren de reactie van het grondwater worden gemeten. Het meten kan plaatsvinden in raaien met peilbuizen. Uit de metingen kunnen de geohydrologische eigenschappen worden afgeleid. De benodigde installatie- en meetcampagne is eenvoudiger dan bij de uitvoering van een pompproef. De uitwerking van dergelijke langdurige meetreeksen (voor het kustgebied) en 13-uurs-metingen in getijdeanalyses vraagt om toepassing van berekeningsmethoden die beschreven zijn in de bijlagen van de TRW of LOR (Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken; het bovenrivierengebied (TAW, 1985) en het benedenrivierengebied (TAW, 1989)).

4.3.3.3 *Putproef*

Een putproef is een pompproef waarbij alleen in de bron de verlaging van de grondwaterstand wordt gemeten en het opkomen van de waterstand bij het uitzetten van de pomp. Hieruit kan alleen het doorlaatvermogen van de watervoerende laag worden afgeleid. De uitwerkingsmethoden voor verschillende typen putproeven en pompproeven, die afhankelijk van de lokale omstandigheden en gewenste resultaten kunnen worden ingezet, zijn uitgebreid beschreven in (Kruseman & de Ridder, 1994). Daarnaast is het computerprogramma MLU beschikbaar waarmee door middel van fit technieken de eigenschappen kunnen worden berekend. In de handleiding van MLU is de methode beschreven (Hemker & Randall, 2013).

4.3.3.4 *Peilbuistest*

Een peilbuistest is eigenlijk een putproef in een peilbuis, die kortdurend wordt aangevuld of waaruit water wordt onttrokken. Dergelijke ‘falling head tests’ of ‘constant head tests’ staan beschreven in bijvoorbeeld het Cultuurtechnisch vademecum (Naudin - Ten Cate e.a., 2000) en in (Hvorslev, 1951). De norm waar een dergelijke test aan moet voldoen is te vinden in “prEN-ISO-DIS 22282-2 en -6 falling head tests” (ISO, 2012a) (ISO, 2012b).

4.3.3.5 *Laboratoriumproeven*

In het laboratorium kunnen doorlatendheidsproeven worden gedaan voor de locaties en diepten waar monsters zijn verkregen uit boringen. In principe zijn dit puntmetingen. Pas als zeer veel puntmetingen zijn verzameld, kan een representatief beeld van de doorlatendheid van een bodemlaag worden opgesteld. In de praktijk is dat slechts plaatselijk haalbaar.



Doorlatendheden van zandmonsters kunnen uit korrelverdelingen worden afgeleid. Een goede interpretatie vindt plaats door gebruik te maken van de methode van Beijer (Beijer, 1964). De doorlatendheid van cohesieve monsters van klei of veen wordt bepaald door meting van het doorstroomde volume per tijdseenheid met een doorlatendheidsapparaat.

De puntmetingen met laboratoriumproeven geven als zodanig niet direct informatie over de heterogeniteit van een afzetting, tenzij zeer omvangrijke dataverzamelingen worden opgebouwd.

4.3.4 Boringen, sonderingen en in-situ sondetechnieken

De meest eenvoudige methode is door sonderingen of boringen uit te voeren en daaruit een grondbeschrijving af te leiden. Op basis van de grondbeschrijving kan de doorlatendheid worden geschat (zie tabel 4.1). De boorbeschrijving moet dan wel van goede kwaliteit zijn.

Bij het sonderen is het aan te bevelen om niet alleen de conusweerstand en lokale wrijving te meten maar liefst ook de waterspanning tijdens het sonderen (NEN, 2013). Uit de wateroverspanning kan eveneens een indruk worden verkregen van voorkomende grondsoorten en vooral de mate van gelaagdheid. Veel en sterk afwijkende pieken in het verloop van de waterspanning ten opzichte van het hydrostatisch drukverloop duiden op de aanwezigheid van een sterke gelaagdheid.

Recentelijk zijn wegdrukbaar sondetechnieken ontwikkeld. Met de Hydraulic Profiling Tool, Mini Pumping Test (HPT/MPT) sondetechniek kunnen in-situ de doorlatendheid van zandlagen en de bergingseigenschappen van zandlagen worden bepaald **REF POV Piping**. Deze techniek komt overeen met een pompproef, zij het op kleinere schaal. De methode is geschikt voor zandlagen onder de grondwaterstand met een verwachte doorlatendheid tussen 0,1 en 200 m/d. Op dit moment vindt nader onderzoek plaats naar een techniek om de anisotropie van het zandpakket te kunnen meten gebaseerd op de HPT/MPT sonde. Tevens kan een glasvezel worden toegepast om de doorlatendheid van zandlagen te bepalen. Beide wegdrukbaar sondetechnieken zijn voornamelijk bedoeld om de doorlatendheid te bepalen in 'ondiepe' zandlagen; tot een diepte van circa 25 m.

4.4 Opzet geohydrologisch model

4.4.1 Schaalgrootte en dimensie van het model

Zoals bij de bespreking van het begrip doorlatendheid al is aangegeven, kan een model nooit de werkelijkheid exact weergeven, omdat een model nooit op alle schalen alle aspecten van het probleem kan beschrijven. Een model moet daarom focussen op de locatie waar de maatregel gepland is. Bovendien moet de keuze van het type model worden afgestemd op de vraag die moet worden beantwoord (i.c. het ontwerp of de beoordeling van een drainagesysteem).

Allereerst moet aandacht worden besteed aan de keuze van de wijze van modellering. Voor modellering van een putstelsel langs een waterkering is een (semi)driedimensionaal grondwatermodel vereist, aangezien daarmee het stromingsveld en de omgevingseffecten goed kunnen worden afgeleid. De schaalgrootte is belangrijk en kan dan in combinatie met een tweedimensionaal grondmechanisch model worden gebruikt, om te kijken wat het effect van een verlaging in de waterspanning is op de stabiliteit van de waterkering.



4.4.2 Vooronderzoek met analytische berekeningen

In de volgende paragrafen worden analytische berekeningsmethoden in semi-3D-modellering en 2D-doorsnede-modellering met elkaar vergeleken.

4.4.3 Analytische semi-3D-modellering ten behoeve van het voorontwerp

Voor snelle eerste schattingen bij een ontwerp van gewenste verlagingen en optredende debieten in een drainagesysteem kan gebruik gemaakt worden van analytische berekeningsmethoden. Het voordeel van een analytische methode is dat het model eenvoudig is en daardoor transparant bij de beoordeling van berekeningsresultaten. Die transparantie is ook een voordeel bij toepassing in een ontwerpsituatie waarbij een gevoeligheidsanalyse of een haalbaarheidsanalyse moet worden gemaakt. Het nadeel is dat de schematisatie sterk vereenvoudigd is zodat een ingewikkeldere geometrie met een numeriek model moet worden doorgerekend.

4.4.3.1 Een enkele volkomen bron

De eenvoudigste analytische berekeningswijze voor grondwaterstroming in een watervoerende laag gaat uit van een onttrekking door een enkele bron. Er dient wel eerst te worden bepaald wat de optredende natuurlijke grondwaterstroming in de watervoerende laag door optredend hoogwater op de rivier is die plaatsvindt in de richting van het achterland met een lager waterpeil.

Aan de hand van vergelijkingen over de grondwaterstroming, bijvoorbeeld verzameld in (Huisman, 1972), kan de grondwaterstroming van een rivier naar het achterland worden bepaald. Het schematische profiel bestaat daarbij uit een watervoerende laag met doorlaatvermogen kD afgedekt door een waterremmende laag met hydraulische verticale weerstand c . De stromingstoestand is vervolgens vereenvoudigd tot de stationaire situatie met de aanname volgens Dupuit (horizontale stroming in de watervoerende laag en verticale stroming in de waterremmende laag). Als voor de spreidingslengte geldt $\lambda = \sqrt{(kD \cdot c)}$, dan kan de stijghoogte s boven het referentiepeil in het achterland op een afstand x vanaf de rivier (of de onderscheiden voedende grens) als volgt worden uitgedrukt:

$$s = s_0 \cdot e^{-x/\lambda} \quad (4.2)$$

waarin s_0 de waterstand in de rivier is boven referentieniveau.

De specifieke grondwaterstroming q (in m^3/d per m' breedte van het watervoerende pakket loodrecht op de stromingsrichting) op een afstand x vanaf de rivier volgt uit differentiatie en is gelijk aan:

$$q = -kD \cdot \frac{ds}{dx} = \frac{s_0 \cdot kD}{\lambda} \cdot e^{-x/\lambda} \quad (4.3)$$

Voor de Darcy-snelheid of flux per strekkende meter geldt:

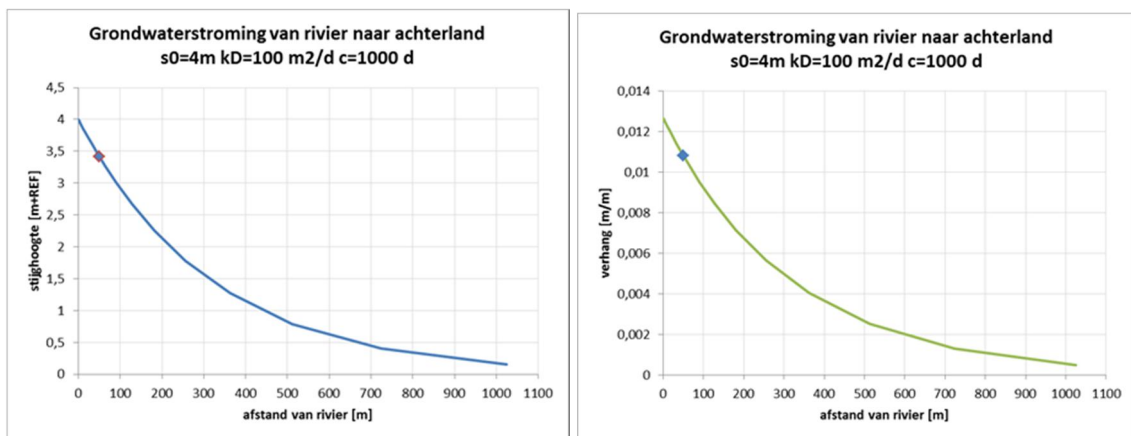
$$v = \frac{q}{D} = \frac{s_0 \cdot k}{\lambda} \cdot e^{-x/\lambda} \quad (4.4)$$

Het verhang is dan gelijk aan:

$$i = \frac{ds}{dx} = \frac{s_0}{\lambda} \cdot e^{-x/\lambda} \quad (4.5)$$



In de grafieken is een voorbeeld uitgewerkt. In het voorbeeld is de verdeling van de stijghoogte en de stroming naar het achterland weergegeven voor een situatie waarbij de waterstand in de rivier 4 m boven het polderpeil stijgt (Figuur 4.9). Als referentieniveau is 0 m+REF aangehouden, als weerstand van de toplaag 1.000 dagen, als dikte van de watervoerende laag 10 m en als doorlatendheid 10 m/d. Het resulterende doorlaatvermogen bedraagt dan 100 m²/dag. Tussen de rivier en het watervoerende pakket is geen weerstand aanwezig en bovendien ontbreekt de wisselwerking met diepere lagen. Voor het voorbeeld is er hier van uitgegaan dat de beschreven toestand een maatgevende situatie zoals de 95% onderschrijdingskans van de grondwaterstand representeert.

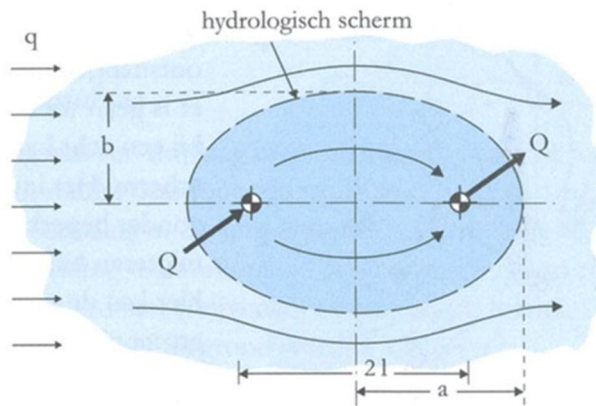


Figuur 4.9 Verdeling van stijghoogte en stroming naar het achterland voor een rivierstand 4 m boven polderpeil zonder drainagesysteem

Als de afstand van de rivier tot de teen van het binnentalud van de dijk bijvoorbeeld 50 m is, dan bedraagt de stijghoogte $h_{95\%} = 3,4$ m+REF en de snelheid en het verhang van de grondwaterstroming bedragen ter plekke respectievelijk ongeveer $v = 0,1$ m/d en $i = 0,011$ m/m.

Een onttrekkingsbron kan worden geïntroduceerd om de stijghoogte die een gevolg is van de hoge waterstand in de rivier, te verminderen onder de dijk. Om de stroming correct af te beelden moet rekening worden gehouden met de voeding vanaf de rivier. Uitgaande van het concept van putstroming, kan de “method of images” worden aangehouden. Bij deze methode wordt gebruik gemaakt van zogenaamde spiegelbronnen (Figuur 4.10).

Bij toepassing van deze methode wordt wel een verdere vereenvoudiging doorgevoerd. Verondersteld wordt dat de grondwaterstroming in een volledig afgesloten watervoerende laag (weerstand van de toplaag is dan oneindig groot) plaatsvindt en dat de onttrekkingsput het volledige pakket doorsnijdt; dit wordt ‘een volkomen bron’ genoemd. Omdat het verlies door kwel niet groot is, lijkt dat toelaatbaar voor het gebied onder de dijk. In dat geval kan het effect van de onttrekkingsput op de stijghoogte worden opgeteld (superpositie) bij de waterspanning als gevolg van de uniforme stroming in de watervoerende laag.



Figuur 4.10 Effect van het plaatsen van een infiltratie- en onttrekkingsbron op de stroming van het grondwater, Grondwaterzakboekje (Bot, 2011). Deze oplossing kan worden gebruikt bij het modelleren van een enkele bron langs een rivier. In deze toepassing van de oplossing voor de analytische modellering kijken we alleen naar de rechterzijde van de afbeelding waarbij de symmetrieas staat voor de lijn waar intrede van water uit de rivier plaatsvindt. Al het water dat uit de rivier naar de bron stroomt wordt geschematiseerd in deze berekeningswijze door een (fictieve) spiegelbron te plaatsen met een gelijk retourdebiet aan linkerzijde op gelijke afstand van de symmetrieas. Het invanggebied van de bron wordt aangegeven door de stippellijn waarbij staat aangegeven "hydrologisch scherm"

Het beeld dat ontstaat, is bijvoorbeeld beschreven in het Grondwaterzakboekje (Bot, 2011), waarin ook enkele kenmerkende maten worden aangegeven van de omvang van het beheerste invanggebied:

$$a = \pm \sqrt{l^2 + \frac{Q \cdot l}{\pi \cdot q}} \quad (4.6)$$

$$b = \sqrt{\frac{Q \cdot l}{\pi \cdot q}} \quad (4.7)$$

Voor het geval van een semi-afgesloten pakket kan de verlaging nabij de bron en het daarbij optredende onttrekkingsdebiet worden berekend met eenvoudige formules voor putstroming volgens Deglee op basis van de Besselfunctie, orde 0. De formule luidt:

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi kD} K_0(r/\lambda) \quad (4.8)$$

Wanneer wordt uitgegaan van de methode met spiegelbronnen dan geldt:

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi kD} [K_0(r_1/\lambda) - K_0(r_2/\lambda)] \quad (4.9)$$

Deze wiskundige functie kan met een spreadsheet worden toegepast. Omdat we alleen geïnteresseerd zijn in de verlaging evenwijdig aan de rivierdijk, kunnen we schrijven:

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi kD} [K_0(y/\lambda) - K_0(\sqrt{y^2 + 4l^2}/\lambda)] \quad (4.10)$$

Gesteld dat in het voorbeeld de bovengrenswaarde van de stijghoogte (met een kans van onderschrijding van 95%) minstens $\Delta s = 1,4$ m moet worden verlaagd tot op een afstand van 25 m ter weerszijden van de bron, dan is het daarbij optredend debiet $Q = 645 \text{ m}^3/\text{dag}$.



In het voorbeeld geldt:

$$q = v \cdot D = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ m}^2/\text{d} \text{ en } l = 50 \text{ m} \quad (4.11)$$

Het door de bron beheerste invanggebied heeft bij de aangehouden afmetingen en debieten een omvang met kenmerkende afmetingen van $a = 110 \text{ m}$ en $b = 98 \text{ m}$.

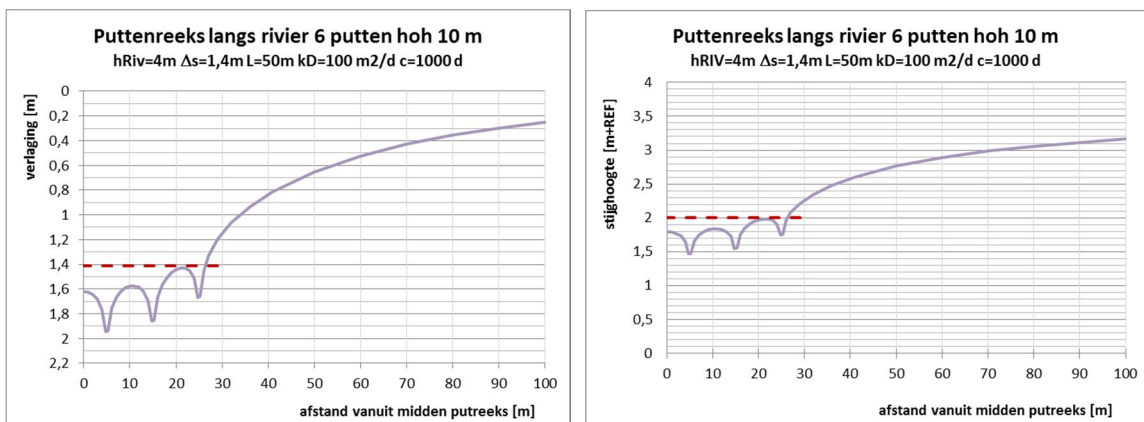
4.4.3.2 Meerdere volkomen bronnen

Een drainagesysteem bij een waterkering zal altijd bestaan uit meerdere bronnen, omdat voor een waterkering over een zekere lengte een verlaging vereist is. Door de onttrekking te verdelen over meerdere bronnen kan de verlaging per bron worden bepaald, het debiet verder worden verfijnd en het overloophniveau van de bronnen worden afgeleid. Ook een dergelijke, vrij eenvoudige ontwerpberekening kan worden gemaakt door gebruik te maken van de “method of images”.

$$\Delta s = \sum_i \frac{Q_i}{2\pi k D} \left[K_0(y_i/\lambda) - K_0(\sqrt{y_i^2 + 4l^2}/\lambda) \right] \quad (4.12)$$

In het voorbeeld is uitgegaan van een drainreeks van 50 m lengte. De reekslengte van 50 m stemt toevallig overeen met de dijkvakgrootte van 50 m die bij de beschouwing van macrostabiliteit wordt aangehouden.

Stel dat voor de putafstand (in de lengte richting van de dijk) 10 m wordt gekozen. Voor een drainreeks van 50 m lengte zijn dan zes putten nodig. In het voorbeeld is uitgegaan van boringen met een diameter van 0,5 m. Om de benodigde verlaging midden tussen twee putten aan het uiteinde van de puttenreeks te behalen, kan het debiet verkleind worden van de eerste schatting van $645 \text{ m}^3/\text{d}$, onttrokken door een enkele bron, naar $485 \text{ m}^3/\text{d}$, verdeeld over zes bronnen met circa $81 \text{ m}^3/\text{d}$ per bron. De verdeling van de stijghoogteverlaging over de (halve lengte van de) puttenreeks is aangegeven in Figuur 4.11. De berekende stijghoogteverlaging wordt gesuperponeerd op het eerder berekende verhang van de stijghoogte vanaf de rivier zonder drainagesysteem. Het resultaat geeft het theoretische overloophniveau van iedere bron. Dit overloophniveau moet liggen boven het binnendijkse waterniveau tijdens maatgevende omstandigheden om af te kunnen wateren onder vrij verval.



Figuur 4.11 Drainage met 6 putten achter een dijk op 50 m van de oever, met effect op de verlaging (links) en de stijghoogte (rechts) in een raai evenwijdig aan de dijk, inclusief aanduiding in rood van gewenste verlaging



Op basis van deze eerste analytische schatting kan vervolgens een meer gedetailleerde modelberekening voor het ontwerp van het drainagesysteem worden ingezet, bijvoorbeeld met een eindige differentiemodel met ruimtelijk variërende ondergronddata. De berekening zoals hier gepresenteerd geeft de werking van een drainagesysteem met gelijke brondebieten voor een enkele geohydrologische schematisatie met uniforme eigenschappen per modellaag. In werkelijkheid zal moeten worden uitgegaan van een over de puttenreeks variërend debiet bij gelijk overloophoogte. In het detailontwerp moet verder rekening worden gehouden met de weerstand in de afvoerleidingen.

4.4.4 Onderzoek waterbezwaar met tweedimensionaal analytisch doorsnede

4.4.4.1 Zonder aanwezigheid drainagesysteem

Een drainagesysteem wordt langs een rivierdijk aangelegd waar de buitenwaterstand gedurende een bepaalde periode hoger zal zijn dan het (grond)waterpeil in het achterland. Tijdens hoogwater is kweldruk aanwezig in het achterland. Voor de bepaling van de uitgangssituatie zonder drainagesysteem, kan het waterbezwaar van de kwel in het achterland worden afgeleid volgens onderstaande vergelijking:

$$Q_{k;0} = \iint_0^A \frac{\varphi_b(x,y) - h(x,y)}{c} dydx \quad (4.13)$$

In deze vergelijking is $\varphi_b(x,y)$ de stijghoogte in het watervoerende pakket, $h(x,y)$ is de freatische grondwaterstand in de deklaag en c de weerstand van de deklaag. De kwel wordt met deze vergelijking bepaald in een gebied met een oppervlakte gelijk aan A .

De praktische uitwerking van bovenstaande formule komt in de meeste situaties neer op het gebruik van een geohydrologisch model. In de uitwerking van deze case is gebruik gemaakt van de rekenmethode die door Hemker is uitgewerkt voor meerlaagse grondwaterstroming, maar dan toegepast in een doorsnede (Hemker C. , 1984).

Voor de bepaling van het effect van een drainagesysteem is het van belang dat de diverse parameters bekend zijn. Echter, in het geval van geotechnische processen, zoals bij het opbarsten van een slootbodem of bij het opdrijven van een kering, zijn de parameters zoals de weerstand van de deklaag $c(x,y)$ en het stijghoogteverloop $\varphi_b(x,y)$ moeilijk te bepalen met het geohydrologische model. Bovendien is de freatische grondwaterstand $h(x,y)$ een kritische parameter. In een natte periode zal de grondwaterstand hoger zijn dan het polderpeil, deze wordt dan vooral bepaald door eventueel in de polder aanwezige drainage. In zeer extreme situaties, zoals het Maatgevend Hoog Water, zal het polderpeil niet meer gehandhaafd kunnen worden, dit stijgt dan tot het maaiveld. In dat geval zal ook drainage niet meer kunnen functioneren. Voor maatgevende omstandigheden is het reëel om aan te nemen dat de grondwaterstand $h(x,y)$ in een groot gebied gelijk is aan het maaiveld.

Een pragmatische rekenwijze kan geldig zijn voor polders (maar niet voor deelgebieden van polders, of twee polders die elkaar geohydrologisch beïnvloeden), waarbij de kweldruk vanuit het buitenwater nagenoeg geheel wordt afgevangen door het achterland (Hemker C. , 1984):

$$Q = L_{dijk} \times kD \times L_{traject} \quad (4.14)$$

Waarbij geldt:

Q = Kweldebiet naar het achterland [m^3/dag].
 L_{dijk} = Het verhang van het grondwater in de watervoerende laag onder de dijk [m/m].



kD = Doorlaatvermogen van het watervoerende pakket onder de dijk [m^2/dag].
 L_{traject} = Lengte van het traject waarover het kweldebiet berekend moet worden [m].

4.4.4.2 Na aanleg drainagesysteem

Voor het waterbezwaar van het drainagesysteem zijn twee definities van belang:

- Het waterbezwaar zonder de aanwezigheid van een drainagesysteem ($Q_{k;0}$).
- Het feitelijke waterbezwaar is het waterbezwaar dat door het drainagesysteem wordt onttrokken en geloosd (Q_d). Dit moet ter plekke van de lozingslocatie worden verwerkt door het oppervlaktewater.
- Het additionele waterbezwaar (Q_w) dat door het regionale watersysteem moet worden verwerkt in het verschil met de uitgangssituatie: $Q_w = Q_{k;d} - Q_{k;0}$.

Na aanleg van het drainagesysteem ontstaat extra waterbezwaar ter plaatse van het drainagesysteem zodra het systeem actief is (tijdens hoogwater op de rivier, maar bij passieve systemen wellicht al onder dagelijkse omstandigheden). De tijdsperiode is afhankelijk van de vereiste verlaging, het ontwerp en het type drainagesysteem. Door het drainagesysteem wordt de stijghoogte in het watervoerend pakket verlaagd waardoor de kwelstroom via de deklaag afneemt. Tegelijkertijd ontstaat een directe lozing vanuit het drainagesysteem op het binnenwater, tenzij het waterbezwaar direct wordt uitgeslagen op het buitenwater. Wanneer wordt aangenomen dat de freatische grondwaterstand niet wordt beïnvloed door het drainagesysteem, dan is het waterbezwaar ($Q_{k;d}$) gelijk aan:

$$Q_{k;d} = Q_d + \iint_0^A \frac{\varphi_d(x,y) - h(x,y)}{c} dydx \quad (4.15)$$

In deze vergelijking is Q_d het debiet van het drainagesysteem en $\varphi_d(x,y)$ de stijghoogte in het watervoerend pakket in een situatie met drainagesysteem.

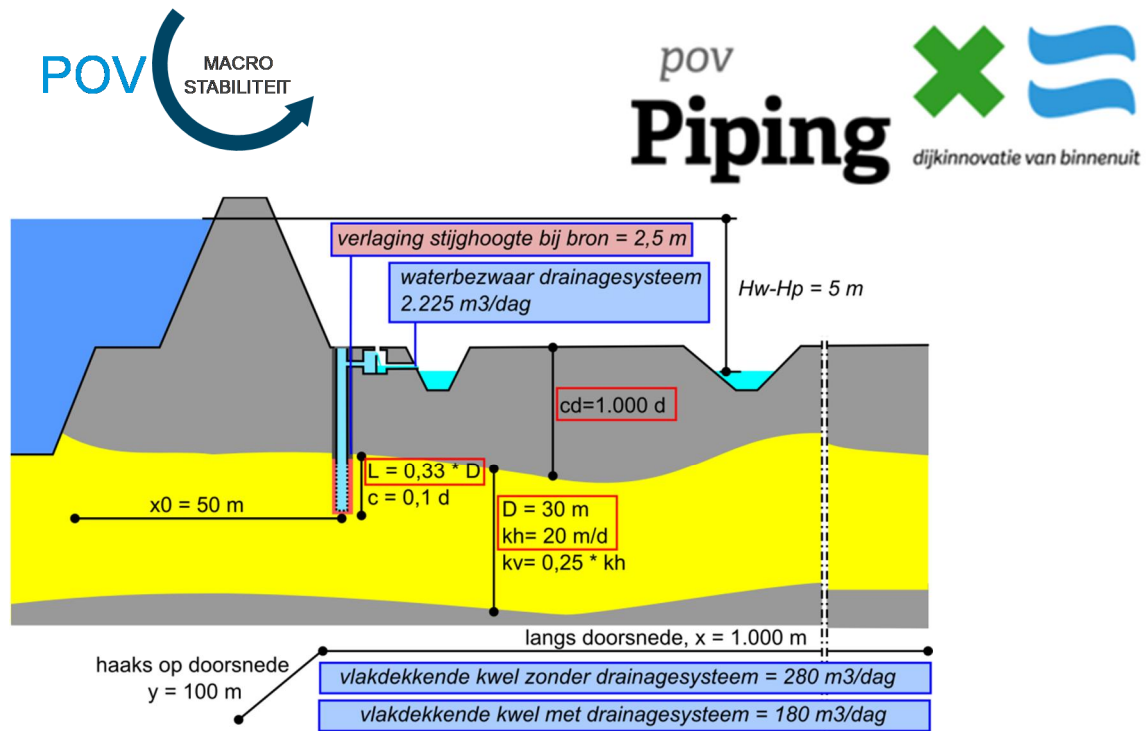
De verandering van het waterbezwaar is van verschillende locatie-specifieke factoren afhankelijk. In de volgende subparagraaf is een voorbeeld opgenomen.

4.4.4.3 Voorbeeld toename waterbezwaar door aanleg drainagesysteem

Het in deze paragraaf beschreven voorbeeld heeft als doel om inzicht te geven in de verandering van het waterbezwaar door de aanleg van een drainagesysteem, en aan te geven wat de invloed van locatie-specifieke factoren daarop is.

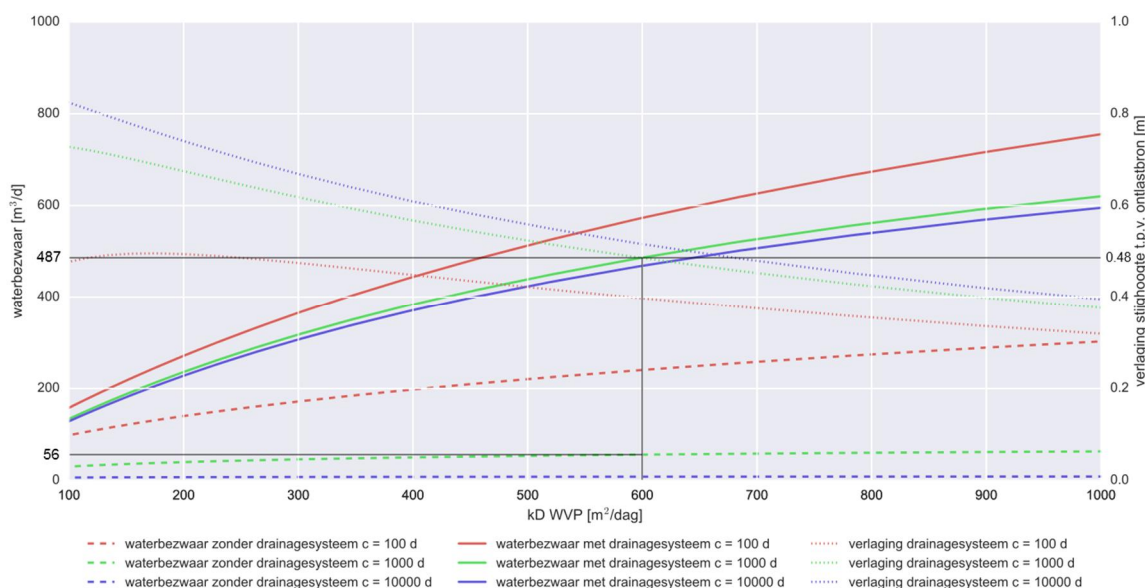
In dit voorbeeld is een sterk vereenvoudigd stationair doorsnedemodel gebruikt. Het voorbeeld van deze situatie is weergegeven in een doorsnede met gekozen geohydrologische waarden (Figuur 4.12). De toestroming naar het drainagesysteem in het doorsnede-model is analytisch berekend. Daarbij is rekening gehouden met de onvolkomenheid van de onttrekking en een weerstand van het onttrekkingsmiddel van 0,1 dag.

Het waterbezwaar is berekend voor een tweedimensionale doorsnede loodrecht op de dijk tot 1.000 m in het achterland. Uitgaande van een lengte evenwijdig aan de dijk van 100 m is de afname van de vlakdekkende kwel 100 m^3/dag (van 280 naar 180 m^3/dag). Het berekende waterbezwaar van het drainagesysteem zelf bedraagt 2.225 m^3/dag .



Figuur 4.12 Voorbeeld analytisch berekend waterbezwaar voor onttrekkingsmiddelen in een doorsnede

Het effect van een verandering van enkele locatie-specifieke factoren op het waterbezwaar is zichtbaar gemaakt door de rood omkaderde parameters in Figuur 4.12 te variëren: dikte en doorlatendheid van de watervoerende laag, hydraulische weerstand van de waterremmende toplaag, diepte van het drainagesysteem waaruit de onttrekking wordt gedaan. Een analyse van het waterbezwaar en de verlaging ter plaatse van de bron bij gevarieerde doorlaatvermogens en deklaagweerstand voor deze vereenvoudigde situatie staat weergegeven in Figuur 4.13. De overige uitgangspunten zijn gelijk aan die in Figuur 4.12, behalve het peilverschil tussen binnen- en buitenwater ($H_w - H_p$) dat op 1,0 m is gesteld. Bij toepassing van dit model bestaat er een lineair verband tussen het peilverschil en het kweldebiet, zodat het waterbezwaar passend bij Figuur 4.12. kan worden berekend door de uitkomst te vermenigvuldigen met het daarin aangehouden peilverschil van 5 m. De zwarte lijn in Figuur 4.13 geeft het waterbezwaar en de verlaging weer voor een peilverschil van 1,0 m bij de parameterwaarden uit Figuur 4.12.



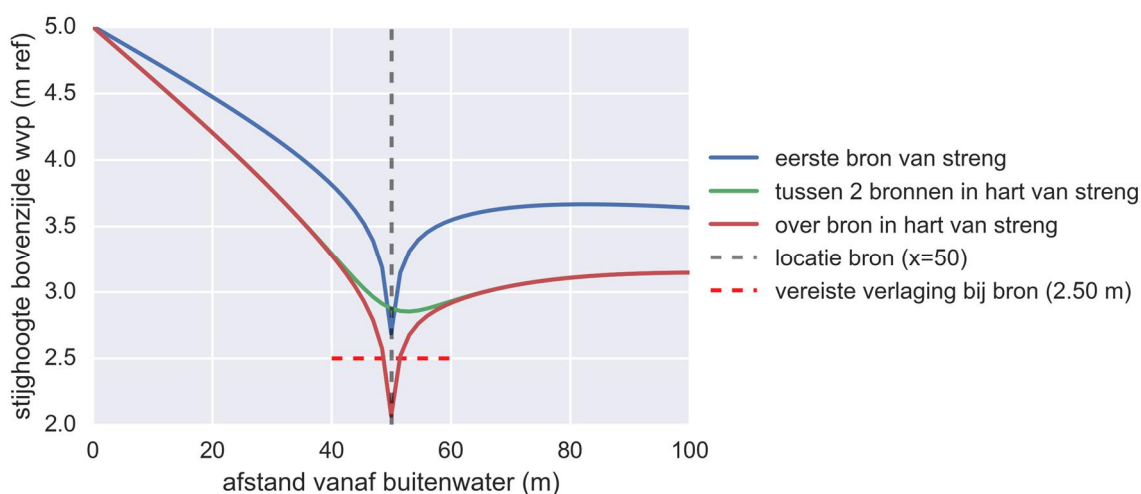
Figuur 4.13 Waterbezwaar zonder drainagesysteem (gestreept), met drainagesysteem (doorgetrokken) en verlaging stijghoogte (rechter-as, stippellijn) bij variatie van kD en c waarden in het gegeven voorbeeld met berekening in een 2D doorsnedemodel met een aangehouden gebied van $100 \times 1000 \text{ m}^2$

Voor een situatie zonder drainage neemt het waterbezwaar toe bij een toename van het doorlaatvermogen van de watervoerende laag. Als een drainagesysteem aanwezig is, dan neemt het waterbezwaar in het achterland af en stijgt het totale waterbezwaar door de onttrekking van het drainagesysteem. De weerstand van de deklaag c is minder dan evenredig van invloed op het waterbezwaar.

Bij het peilverschil van 1,0 m is berekend dat het waterbezwaar in de polder oorspronkelijk $56 \text{ m}^3/\text{d}$ was en door de aanleg van het drainagesysteem toeneemt naar $487 \text{ m}^3/\text{d}$. Bij een peilverschil van 5 m was het waterbezwaar in de polder dan $280 \text{ m}^3/\text{d}$ en wordt het $2435 \text{ m}^3/\text{d}$ in de strook van 100 m lang en de verlaging is dan circa 2,5 m (zoals ook als uitgangspunt was aangehouden).

De voorbeeldsituatie van Figuur 4.12 is berekend met een tweedimensionaal analytisch model. Het model omvat daardoor geen opbolling tussen de bronnen en brengt het 'kopeffect' niet in rekening. Deze effecten zijn geïllustreerd door het voorbeeld ook te berekenen met een driedimensionaal analytisch model in TimML. Het model omvat dezelfde eigenschappen als het tweedimensionale analytische model. Op basis van ervaring is de lengte van de streng (500 m) en het aantal bronnen (30, dus hart-op-hart afstand van 17 m) toegevoegd. Het debiet in beide modellen is gelijk (dus $2.225 \text{ m}^3/\text{dag}/100 \text{ m}$).

Voor een bronlocatie zijn de resultaten gegeven in Figuur 4.14. De figuur laat de berekende verlaging zien in een doorsnede over de bron. De groene lijn geeft de berekende verlaging weer tussen twee bronnen in het midden van de streng. Op deze twee locaties komt de orde grootte van de berekende verlaging overeen met het tweedimensionale model. De blauwe lijn laat zien dat door het kop-effect, de berekende verlaging bij de eerste bron van de streng kleiner is dan in het midden van de streng.



Figuur 4.14 Doorsnede met berekende stijghoogte in bovenzijde watervoerende pakket voor meerdere doorsnedes over de streng

4.4.5 Numerieke modellering 2D of 3D voor uitwerking van het ontwerp

Aanbevolen wordt om na het voorontwerp te werken met een (semi)-driedimensionaal grondwaterstromingsmodel. De driedimensionale effecten (infiltratie vanuit het buitenwater, stroming langs het drainagesysteem en toestroming van grondwater vanaf de polderzijde) en de variatie van drainageweerstanden in het gebied zijn van groot belang voor een correct ontwerp van een drainagesysteem met bronnen of een horizontale lijnonttrekking. Het debiet van een kwelputterscherm verschilt vaak van het debiet dat met een eenvoudig 2D-model wordt bepaald. Ook de stijghoogteverandering ter plekke van de drainagevoorziening in een 3D-modellering zal anders uitpakken dan met een 2D-modellering. Juist om deze reden is het beter om gebruik te maken van een 3D-model.

Geadviseerd wordt om in de basis uit te gaan van de informatie uit een beschikbaar regionaal grondwaterstromingsmodel om de invloed van de waterstandsverlaging door drainage te bestuderen (invloedszone, hoeveelheid benodigde pompcapaciteit e.d.). De uitkomst in de zin van de stijghoogteverdeling in de watervoerende lagen kan vervolgens gebruikt worden als invoer in een tweedimensionaal, grondmechanisch model om de invloed van de waterstandsverlaging op de stabiliteit van de waterkering zelf te beschouwen. Vooraf aan het gebruik van de resultaten in grondmechanisch model zal dan nog wel de aanpassing van de waterspanningen in de waterremmende lagen tijdens de duur van de hoogwatergolf moeten worden berekend omdat die berekening in de gebruikelijke geohydrologische programma's niet wordt gedaan.

4.4.5.1 Schaalgrootte i.r.t. drainagesysteem

Voortbouwend op de vorige paragrafen over schaafeffecten, kan een passende grootte van het rekengrid worden gekozen dat geschikt is voor een geohydrologisch model waar een drainagesysteem mee wordt doorgerekend. Vaak zal de celgrootte in het model niet uniform hoeven te zijn. Direct bij de waterkering moet de grootte van modelcellen of knooppuntafstanden klein zijn. Een eindige-elementenmodel is flexibel in de verdeling van het rekengrid. Bij toepassing van eindige differentieelmodellen moet ter plekke van de waterkering een geringe celgrootte (bijvoorbeeld tussen 1*1 m en 5*5 m) worden aangehouden. Er wordt wel op gewezen dat dergelijke modellen een gemiddelde stijghoogte per rekencel bepalen. De exacte verlaging ter plekke van de drainagevoorziening is daarmee dus niet precies te berekenen. Omdat de lokale extra verlaging in de bron bij het ontwerp van een



drainagesysteem wel van belang is, wordt geadviseerd een eindige differentiëmodel te gebruiken in combinatie met een eindige-elementen model of een analytische berekening.

Verder hangt de juiste keuze van de celgrootte in een model af van de verwachte geologische structuren. Bij een rivier is een celgrootte van 25*25m een redelijke keuze en in het achterland kunnen de cellen eventueel nog groter genomen worden.

De keuze voor de dikte van de modellagen wordt vooral bepaald door de dikte van de aanwezige watervoerende laag waarin de drainerende voorziening wordt geplaatst. In de holocene toplagen zal de dikte van modellagen waarschijnlijk vrij klein worden gekozen (in de range van 0,5 m à 5 m) en in diepere lagen over het algemeen dikker (in de range van 5 tot 50 m). Bij de keuze van de schematisatie speelt ook de lengte van de winmiddelen in relatie tot de dikte van het pakket een rol. een drain wordt veelal ondiep gelegd bovenin een watervoerende laag. Voor correcte modellering waarbij ook de verticale stroming naar de drain kan worden bepaald is een verdeling in vrij dunne modellagen aan te bevelen. Voor modellering van bronnen is de filterdiepte van belang voor de modelopbouw. Als de bronnen even diep zijn als het watervoerend pakket dik is, is sprake van horizontale stroming van het grondwater. Het watervoerend pakket kan dan als 1 laag worden gemodelleerd. In een dik watervoerend pakket met ondiepe bronnen is sprake van "partial penetration" of onvolkomen plaatsing van bronnen. Net als bij een horizontale drainage treedt dan verticale stroming in de watervoerende laag op naar de bronnen en moet het watervoerend pakket in meerdere lagen worden verdeeld om dit te kunnen modelleren.

4.4.5.2 *Positie van de randen op afstand van de drainage (horizontaal en verticaal)*

Voor de analyse van de faalmechanismen piping en macrostabiliteit wordt bij de opzet van grondmechanische modelberekeningen vaak alleen gekeken binnen een gebied van circa 50 tot 100 m. Voor de geohydrologische systeemanalyse is een groter studiegebied nodig. Een straal van enkele honderden meters tot zelfs vele kilometers is mogelijk nodig. De omvang van die straal hangt samen met de kenmerkende waarden van geohydrologische eigenschappen van de bodemlagen. Als het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket waarin de grootste effecten worden verwacht en de hydraulische weerstand van waterremmende lagen die daarboven of daaronder liggen, groot zijn, is de invloedstraal groot.

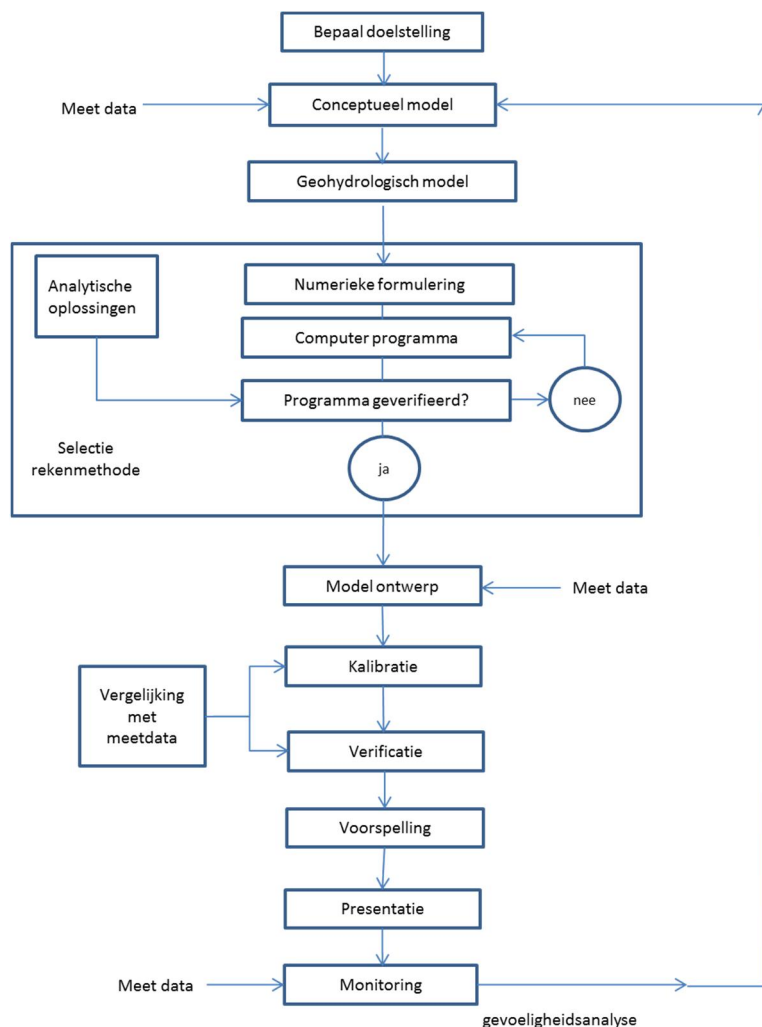
Een vrij algemene methode ter bepaling van de omvang van het invloedsgebied en de daarvoor benodigde studie van een modelgebied is als volgt. Volgens de formule van Mazure (zie <http://www.grondwaterformules.nl/index.php/wie-is-wie/formule-van/mazure>) is op een afstand van drie keer de spreidingslengte het effect van een ingreep nabij de waterkering nagenoeg verdwenen. Men zou ervoor kunnen kiezen om op die afstand een modelrand neer te leggen. De geohydrologische situatie in het gebied en de grootte van de verlaging ter plekke van de ingreep, bepalen de omvang van het modelgebied en de randvoorwaarden die moeten worden gekozen. Wel moet men letten op het effect van eventuele onttrekkingen in de regio wanneer die nabij de modelranden liggen aangezien in die situatie de beoordeling van het model op basis van de analyse van metingen complex kan zijn.

Een tweede methode is om de omvang van een invloedsgebied te bepalen door na te gaan waar zich voedende grenzen (rivier, sloten, open water) bevinden, of andere ingrepen (onttrekkingen van derden) dan wel gesloten randen (wanden, breuklijnen). Om een dergelijk vooronderzoek te doen wordt aangeraden om ook naar regionale stromingspatronen te kijken en naar de regionale geologie zoals die uit eerder genoemde databases met ondergrondmodellen naar voren komen. Gezien de rivier morfologische effecten en

verschillen in rivierbochten, is het verstandig de gehele rivier binnen de modelrand op te nemen en niet te volstaan met het leggen van modelranden op de rivier as.

Voor het ontwerp van een drainagestelsel (verticaal, horizontaal) dienen geohydrologische berekeningen te worden uitgevoerd. Bij voorkeur zijn dit 3D berekeningen, aangezien grondwater niet alleen haaks op de rivier en waterkering stroomt (2D) maar ook daarlangs en via het achterland terug en de invloed van het drainagestelsel op zijn omgeving duidelijk moet worden.

De aanpak van de opstelling van een model bestaat uit verschillende stappen. De uitkomst van iedere stap bepaalt de vervolgstap en op deze wijze ontstaat een schema van modeltoepassing (Figuur 4.15).



Figuur 4.15 Overzicht van een schema voor modeltoepassing

In eerste instantie moet een plan met een visie en doelstellingen voor het onderzoek van het op te lossen probleem worden beschreven. Aan de hand van globale eerste gegevens wordt een beschrijving van het modelsysteem gemaakt, het zogenoemde conceptueel model. Op basis van het uit te voeren onderzoek, het type uit te voeren geohydrologische berekeningen, de verwachte mate van detaillering, de te bereiken resultaten en de te leveren



nauwkeurigheid wordt het meest geschikte programma gekozen voor de aanpak van het beschreven probleem.

In de volgende stap worden de beschikbare gegevens verzameld en gebruikt om de rekenwaarden voor de parameters in het programma in te vullen. Op dat moment is een eerste opzet van een computermodel vervaardigd.

Als meer zekerheid gewenst is over de representativiteit van dat model van de werkelijke situatie, zal een kalibratie of ijking van het model moeten worden verricht met metingen uit het veld. Die metingen moeten ook representatief zijn voor het deel van het geohydrologisch systeem waarin men de ingreep wil uitvoeren. Zo nodig wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de variatie van modelresultaten als gevolg van de bandbreedte in de invoergegevens. Aanvullend kan een verificatie plaatsvinden voor de reactie van het systeem onder andere omstandigheden (bijvoorbeeld zomer/wintersituatie).

Daarna is het model gereed voor een predictie van de dimensies en effecten van een ingreep in het gemodelleerde geohydrologische systeem. De resultaten kunnen vervolgens worden geëvalueerd en indien nodig met verbeterd inzicht opnieuw gegenereerd.

4.4.6 Modellering van bronnen

In numerieke modellen kan de modellering van een bronnenscherm op twee verschillende manieren plaatsvinden:

- Bronnen met een constant debiet.
- Bronnen met een vaste potentiaal.

De eerste methode legt in een model op dat uit een knooppunt (FEM) of cel (FDM) een vaste hoeveelheid grondwater per tijdseenheid wordt onttrokken. In eindige differentieprogramma's (FDM) op basis van MODFLOW is het invoeren van bronnen met een constant debiet mogelijk via het 'well package'. Met het rekenmodel wordt de stijghoogte berekend die ten gevolge van die onttrekking ontstaat.

De tweede methode past het best bij gebruik van een drainagesysteem met overloopbronnen. Bronnen met een overloophoogte kunnen worden geschematiseerd als bron met een vaste potentiaal. Een mogelijke aanpak is om de modellering aan te pakken door gebruik te maken van het 'drain package'. Daarin moet een 'conductance' (in m^2/d) en een drainageniveau (in m+NAP) worden opgegeven. Door gebruik van de 'drain package' wordt voorkomen dat de bronnen in het model gaan infiltreren als de stijghoogte beneden het drainageniveau zakt, wat wel kan gebeuren als de 'river' of 'general head boundary package' worden gebruikt.

Als het wenselijk is om de stroming naar een bron of drain zeer gedetailleerd te modelleren, dan is een kleine celgrootte vereist. Door de kleine celgrootte kan de weerstand van het filter en omstorting aan individuele modelcellen worden opgelegd. Een alternatief is om een celgrootte toe te passen die ettelijke malen groter is dan de diameter van het boorgat van de bron. Dan kunnen de weerstand van het filter en omstorting via de conductance worden gemodelleerd, namelijk:

- De numerieke hydraulische weerstand die samenhangt met de doorlatendheid en de afmeting die voor de modelcel geldt waarin de bron of drain zich bevindt.



- De fysieke intreeweerstand die in werkelijkheid op de boorgatwand aanwezig kan zijn ten gevolge van het aanlegproces en het gebruik van de bron. Deze weerstand hangt samen met de aanwezige versmering met kleideeltjes op de boorgatwand en de verstopping van de omstorting of de bron (ook wel skin factor genoemd).

Voor een goede schatting van de fysieke intreeweerstand is weinig informatie beschikbaar. Informatie kan bijvoorbeeld gevonden worden in (Houben, 2015). De waarde is zeer afhankelijk van de lokale omstandigheden, de omliggende grond en het aanlegproces. Dit betekent dat gemaakte keuzes tijdens de modellering over bijvoorbeeld de versmering van het boorgat moeten worden meegenomen als eis in de uitvoering. Een drainageweerstand of intreeweerstand (in dagen) wordt in de praktijk gehanteerd voor horizontale drainage. [zie www.grondwaterformules.nl en het grondwaterzakboekje]. De drainageweerstand wordt omgerekend naar een conductance:

- Drainage conductance [m^2/dag] = natte oppervlak drain [m^2] / drainageweerstand [d].

Deze methode kan ook worden gehanteerd voor verticale bronnen. Het natte oppervlak is daarbij gelijk aan de lengte van het putfilter vermenigvuldigd met de omtrek van het boorgat.

Op basis van de beschouwing met hiervoor vermelde relatie is de verwachting dat een realistische waarde van de conductance in de orde van grootte van $100 \text{ m}^2/\text{dag}$ bedraagt.

Ondanks de onzekerheid moet het model zo worden ingesteld dat de gewenste verlaging rond de bronnen wordt bereikt. Vervolgens kan worden vastgesteld met de waterbalans van het model welk debiet er uit de bronnen komt. De in te voeren conductance voor de overloopbronnen is slechts via variatieberekeningen af te tasten. Uit variatieberekeningen (Deltares, 2013) uitgevoerd voor een modelonderzoek naar het effect van pipingmaatregelen, blijkt dat alleen bronnen met een hoge conductance enig effect hebben op de stijghoogte. Dit betekent dat bronnen met kleine verliezen moeten worden toegepast. Een manier om hiermee om te gaan is om eerst te starten met berekeningen met invoer van bronnen met een vast debiet en daarbij te onderzoeken welk debiet nodig is om de gewenste verlaging te verkrijgen. Vervolgens kunnen berekeningen worden gedaan met invoer van bronnen volgens 'drain package' waarbij waarden van de conductance worden gevarieerd totdat het eerder berekende debiet is gevonden. Uit ervaring blijkt dat de conductance die in MODFLOW moet worden ingevoerd, meestal een grootte heeft van enkele tientallen tot 100 à $250 \text{ m}^2/\text{dag}$.

Van model naar uitvoering

De aan te houden conductance is dus een onzekere factor in de modellering. Voor de praktijk wordt aanbevolen om na plaatsing van de eerste bron in een project put- of pompproeven uit te voeren. Bij de uitwerking van put- of pompproeven kan de skin factor worden afgeleid uit ijking van de verlagingberekening met de metingen. Zie voor een toelichting (Hemker & Randall, 2013) of (Kruseman & de Ridder, 1994) waarmee de eerdere modellering kan worden gecontroleerd.

Vervolgens zal de 'performance' van het aangelegde drainagesysteem door middel van stijghoogtemetingen moeten worden geverifieerd. Het overloopniveau van het systeem zal in de praktijk mogelijk op basis van de metingen moeten worden bijgesteld. In het ontwerp moet hiermee rekening worden gehouden. Dit kan tijdens een wintersituatie met (zeer) hoge rivierstanden of door in de bronnen tijdelijk een onderwaterpomp te hangen en actief te onttrekken. Eigenlijk is verder onderzoek naar de drainageweerstand een noodzakelijke actie indien dergelijke systemen worden toegepast (Deltares, 2013).



Voor de praktijk wordt aanbevolen om bij het onderzoek vooraf aan het ontwerp van een drainagesysteem enkele putproeven uit te voeren waarmee in de ontwerpfase de eigenschappen van de bronnen, inclusief debiet en verlaging in de bron kunnen worden bepaald.

Hoewel dit voor de geohydrologische modelberekeningen niet direct van betekenis is, wordt voor het overkoepelend systeemontwerp opgemerkt dat men wel bedacht moet zijn op de systeemweerstand van het drainagesysteem tussen de bron en het lozingspunt. Wanneer er wordt gewerkt met smalle, lange afvoerbuizen, neemt de systeemweerstand toe en beperkt dit het afvoerdebiet. Wanneer bijvoorbeeld ook nog wordt gewerkt met smalle overlaten, dan is het "vaste niveau" in het filter mogelijk zo'n 0,10 m hoger dan het niveau van de overlaat zelf.

4.4.7 Oppervlaktewater (binnendijks, en waterstandsverloop)

Binnendijkse polderwatergangen kunnen in een geohydrologisch model in meer of minder detail worden meegenomen. In de polderwatergangen worden veelal beheerspeilen aangehouden. Afhankelijk van de geohydrologische situatie (gemiddelde stijghoogten door het jaar heen met normale fluctuatie afhankelijk van neerslag, seizoen of getij, hoge stijghoogten nabij de waterkering door hoge rivierstanden) zal sprake zijn van kwel naar of infiltratie vanuit de watergangen. De mate van kwel of infiltratie hangt af van:

- Waterstand in de watergang (zomerpeil/winterpeil).
- Grondwaterstijghoogte in de watervoerende laag onder de watergang.
- Natte omtrek van de watergang of de breedte van de slootbodem.
- Insnijdingsdiepte (bodemniveau) van de watergang).
- Hydraulische weerstand van de bodem van de watergang.
- Weerstand van de slecht doorlatende bodemlagen onder de bodem van de watergang.

Het is mogelijk dat in sloten achter waterkeringen door het optreden van een hoge stijghoogte de bodem opbarst. In die situatie zal de hydraulische weerstand van de slootbodem zeer sterk teruglopen. Goede modelinvoer hangt daarom samen met grote gebiedskennis.

Voor informatie over de binnendijkse watergangen (geometrie en polderpeilen) kan gebruik worden gemaakt van informatie van de waterschappen (legger en keurgegevens). Afhankelijk van het lokale water- en peilbeheer kunnen de waterstanden (beperkt) fluctueren (zomer- en winterpeilen). Indien het grondwaterstromingsmodel ModFlow wordt gebruikt wordt de weerstand van de waterbodem vertaald in een 'conductance'.

4.4.8 Drainageweerstand in de polders

Indien in de polders drainagebuizen in de percelen aanwezig zijn, vangen deze het kwelwater op en leiden dat naar de poldersloten. De afvoer door de drainage wordt bepaald door:

- Het drainageniveau van de drainagebuizen.
- De gemiddelde freatische grondwaterstand in de polder.
- De hydraulische weerstand die ontstaat bij de toestroming van grondwater naar de drainbuizen.

Meestal worden bij de opzet van modellen met grotere ruimtelijke omvang (op basis van eindige-differentiemethode of eindige-elementenmethode) aannamen gedaan voor de weerstand in het geheel van watergangen. Daarbij wordt de stromingsweerstand tussen



grondwaterstand en slootpeil in de watergangen geschematiseerd door middel van een (bovenste) waterremmende laag met de zogenoemde drainageweerstand. De weerstand van de drainagelaag is te schatten, maar met enige mate van onzekerheid. Om het effect van de drainagelaag goed te kiezen zal de aangehouden waarde door middel van ijking moeten worden geverifieerd. Een algemene aanname is dat de drainageweerstand (in dagen) van een polder gelijk is aan de afstand tussen de sloten of drainagemiddelen (in meter). Voor de globale uitwerking van de drainageweerstand wordt verwezen naar de beschrijving in het Grondwaterzakboekje (Bot, 2011). In vermelde literatuur zijn richtgetallen aangegeven voor waarden van de drainageweerstand bij verschillende situaties (grondwatertrap of diepe van de ontwatering) en drainageafstanden.

In gedetailleerdere modellen kan men ook schattingen maken voor de weerstand van de sliblaag op de bodem van watergangen. Ijking zal lastig zijn indien data van de grondwaterstandsverdeling ter plekke ontbreken. Het is vanwege dit punt aan te bevelen om ook meetraaien te plaatsen die verder, in logaritmisch toenemende afstand, naar het achterland doorlopen. In maatgevende omstandigheden (UGT) kan het voorkomen dat de perceelsloten gevuld zijn tot aan het maaiveld.

4.4.9 Oppervlaktewater buitendijks

Bij de opzet van een geohydrologisch model voor de effecten op de waterkering vormt het buitenwaterstand de belangrijkste invoerparameter.

Een oppervlaktewater met een stijgend peil voedt het geohydrologisch systeem. De infiltratie naar de bodem wordt op een zelfde wijze berekend als bij de oppervlaktewatersystemen binnendijks. Bepalend zijn:

- Waterstand in de rivier bij een zekere rivierafvoer met een frequentie van optreden.
- Grondwaterstijghoogte in de watervoerende laag onder de rivier.
- Natte omtrek of breedte van de rivier.
- Insnijdingsdiepte (bodemniveau) van de rivier (let op kriberosiekuilen, buitenbochten).
- Hydraulische weerstand van de bodem van de rivier.
- Weerstand van de slecht doorlatende bodemlagen in de ondergrond van de rivier.
- Opbarsten van de bodem van het oppervlaktewater (sloot).

De weerstand van de bodem van de rivier is afhankelijk van de stromingssnelheid op de rivier. Het is de vraag of daardoor sliblagen worden geërodeerd of zelfs insnijding in kleiige of zandige lagen optreedt. Het profiel van de rivierbodem kan hierover uitsluitsel geven en dat wordt bepaald door lodingen of sonarmetingen uit te voeren. Een tabel met indicatieve waarden voor de bodemweerstand kan bijvoorbeeld worden gevonden in het Grondwaterzakboekje (Bot, 2011). De vorm van het dwarsprofiel van de rivier en de insnijding in zandige lagen onder een slecht doorlatende afdekking kan meespelen in de bepaling van het intredepunt ofwel de bepaling van de kwelweglengte. Vooral nabij schaar dijken is deze extra kwelweglengte kritisch in de analyse.

Met betrekking tot de breedte van de rivier geldt dat bij overschrijden van een drempelniveau de zomerdijk wordt overschreden. De breedte van de rivier wordt dan vermeerderd met de breedte van de uiterwaarden. Behalve de hydraulische weerstand van de rivierbodem is ook de aanwezige toplaag in de uiterwaarden van belang, in het bijzonder bij de aanwezigheid van eventuele stroomgeulen, kolken en vergravingen in het gebied van de uiterwaarden. Het is belangrijk om de bodemopbouw in het voorland goed na te gaan met grondonderzoek.



In het geval dat het rivierbed zich in de toekomst zal verleggen en het effect daarvan op de toestand van de dijk belangrijk kan zijn, is het noodzakelijk om een dergelijke situatie te onderzoeken, ook met geohydrologische modelleringen. Mogelijk is dit namelijk een kritisch scenario (UGT).

De waterstanden op de rivier variëren met de rivierafvoer en voor benedenrivieren bovendien met het getij. Van deze waterstanden zijn historische reeksen beschikbaar die worden gemeten op diverse locaties, en deze zijn op te vragen via Rijkswaterstaat. Voor ontwerp- en toets-doeleinden wordt vaak het niveau van het Maatgevend Hoog Water (MHW) gebruikt. Dit is de berekende waterstand aan het einde van de planperiode, met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de norm. Voor primaire waterkeringen staan de MHW standen in Hydraulische Belastingen, behorende bij het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017b). Ook is een werkwijzer beschikbaar voor de bepaling van de hydraulische ontwerprandvoorwaarden (Deltares, 2016c).

Het omgaan met de waterstand van de rivieren in Nederland voor ontwerp- en toetsdoeleinden staat beschreven in het Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied (ENW, 2007a). Rekening moet bijvoorbeeld worden gehouden met opwaaiing en de windsnelheid.

Voor niet-primaire keringen, de regionale keringen, kan gebruik gemaakt worden van de Leidraad Toetsen op veiligheid voor Regionale waterkeringen (STOWA, 2015). Voor primaire waterkeringen is in het Technisch Rapport Waterkerende Constructies aangegeven hoe de waterstandsverloop in rekening moet worden gebracht tijdens maatgevende belasting. Per soort waterkering is dit aangegeven (zeedijken, meerdijken en dergelijke).

4.4.10 Grondwateraanvulling vanuit neerslag

Op niet bebouwd en niet gerioleerd oppervlak vindt aanvulling plaats van het grondwater vanuit de neerslag. Tevens kan daar verdamping optreden. De verdeling van neerslag en verdamping wordt gebaseerd op de waarnemingen volgens meetstations of radargegevens van het KNMI. Deze data zijn ook via het NHI beschikbaar tot en met 31 december 2010. Voor het correct modelleren van de grondwateraanvulling, moet eigenlijk een model voor het gedrag van de onverzadigde zone meegenomen worden, zoals bijvoorbeeld MetaSwap dat in het model MORIA wordt toegepast. Dit is echter niet gebruikelijk voor normale toepassing van grootschalige regionale geohydrologische modellen, die bijvoorbeeld zouden kunnen worden ingezet voor het ontwerp van een drainagevoorziening onder een waterkering.

Het kleidek op de dijk belemmert de infiltratie van neerslag slechts ten dele, zie paragraaf 2.2.9 in (ENW, 2004). Bij een modelberekening met een regionaal model voor het ontwerp van een drainagevoorziening wordt de verandering van de freatische lijn in de waterkering waarschijnlijk niet correct of helemaal niet bepaald. In veel situaties zal de bepaling van de verandering van de freatische lijn die effect heeft op de wijziging van waterspanningen in het grondprofiel van een waterkering, aanvullend moeten plaatsvinden op de modelberekening voor het ontwerp van een drainerende voorziening in een watervoerende laag onder de waterkering.

Hoogwater komt in Nederland (bijna) altijd voor in het winterseizoen, daarom is werken met een jaargemiddeld neerslagoverschot niet representatief voor het ontwerpen van een drainagesysteem. Voor het winterseizoen geldt een gemiddelde neerslag van 2 mm/dag met minimale verdamping. In deze TR wordt voorgesteld om berekeningen voor een drainagesysteem bij waterkeringen bij GHW (Gemiddeld Hoog Water) te laten aansluiten bij



een neerslagoverschot van 2 mm/dag. Berekeningen voor een drainagesysteem voor een situatie met een hydraulische belasting die hoort bij een maximale overstromingskans, moeten robuust worden ontworpen en daarom wordt voorgesteld om aan te sluiten bij een neerslagoverschot van 2 mm/dag + 50% = 3 mm/dag.

Waterschappen en Provincies houden de vergunningverlening en de jaaropgaven van vergunde onttrekkingen bij. Onttrekkingen van grondwater vinden plaats door drinkwaterbedrijven, door industrie, bij grote bodemsaneringen, bij bouwprojecten en bij WKO-installaties. Voor de opzet van een geohydrologisch model moeten de onttrekkingsgegevens worden opgevraagd bij het bevoegd gezag.

Bij het ontwerp van het drainagesysteem bij het project SLa is bijvoorbeeld aangenomen dat de drinkwateronttrekkingen niet langer actief zijn. Een dergelijke aanpak leidt tot een conservatief, robuust ontwerp. Aan de andere kant moet ook onderscheid worden gemaakt tussen de huidige gemiddelde onttrekking en een maximale onttrekking die nodig is in de toekomst.

4.4.11 Aanwezige grondwateronttrekkingen

In het gebied van de in te richten drainagevoorziening bij de waterkering kunnen al bestaande grondwateronttrekkingen actief zijn. De Waterschappen en Provincies houden de vergunningverlening en de jaaropgaven van vergunde onttrekkingen bij. Dit betreft de onttrekkingen van grondwater door drinkwaterbedrijven, industrie, grote bodemsaneringen, bouwprojecten en WKO-installaties. Voor de opzet van een geohydrologisch model moeten de onttrekkingsgegevens worden opgevraagd bij het bevoegd gezag en/ of bij de drinkwaterbedrijven.

4.4.12 Grondwaterstanden

Voordat het model kan worden gekalibreerd moeten van de belangrijkste locaties, waarvoor de modelstudie wordt gemaakt, metingen worden verzameld waarmee de modelresultaten kunnen worden vergeleken. Dat wil zeggen dat op kenmerkende plekken in en nabij de waterkering raaien met peilbuizen moeten zijn geplaatst waar metingen van grondwaterstanden worden gedaan. Deze metingen moeten gedurende een langere periode worden gedaan zodat ook in die periode wisselende rivierstanden optreden.

Het is aan te bevelen om de metingen, bijvoorbeeld met Menyanthes, op samenhang met mogelijke oorzaken van variatie van standen (weersomstandigheden, seizoen, rivierpeilen, wisselende onttrekkingen indien die in de omgeving voorkomen) te onderzoeken. Dergelijk onderzoek is echter niet gebruikelijk. Door de metingen uit te zetten in verhanglijnen en eventuele verschillen te bepalen kunnen ook al voorzichtige conclusies over de samenhang tussen de metingen en de omstandigheden worden getrokken.

4.4.13 Keuze van rand- en beginvoorwaarden

Ten behoeve van de afleiding van randvoorwaarden voor het model zullen op de voorziene rand van het model metingen van peilbuizen moeten worden verzameld of zal gebruik moeten worden gemaakt van opgestelde isohypsen van de grondwaterstanden in de diverse watervoerende lagen die gelden voor kenmerkende tijdstippen in de studie.



4.5 Beschikbare computersoftware

4.5.1 Gestandaardiseerde modellen

Rekenprogramma's die voor (semi)3D grondwaterberekeningen gebruikt kunnen worden, zijn ModFlow of MicroFEM en FEFLOW. Eventueel kan het programma iMOD of iModFlow gebruikt worden (op ModFlow gebaseerd met een door Deltares ontwikkelde schil). MicroFEM is een eindige elementenprogramma (EEM), ModFlow een eindige-differentieprogramma (EDM). Een EEM-programma heeft ten opzichte van EDM het voordeel dat de discretisatie van het gebied beter de topografische structuur kan volgen en de stijghoogten in groter detail kan genereren ter plekke van de drainerende voorziening in het probleemgebied.

Het toepassen van rekenmethoden houdt modelafwijkingen en afrondingsfouten in, en dus zijn de modelresultaten altijd benaderingen. De rekenmethoden zijn meestal semi-driedimensionaal. Dit houdt in dat de stijghoogteverdeling in een watervoerende laag wordt berekend en vergeleken met rekenresultaten voor een onder- of bovenliggende laag. Dat houdt in dat de verdeling van de waterspanning in verticale richting door de waterremmende lagen heen niet wordt bepaald. Optimalisatie van modellen met geautomatiseerde ijking door parametervariatie is in de meeste geohydrologische rekenprogramma's mogelijk.

Met de rekenprogramma's kunnen zowel stationaire als tijdsafhankelijke berekeningen worden uitgevoerd. Voor stationaire berekeningen volstaan bodemeigenschappen als doorlatendheid, doorlaatvermogen en hydraulische weerstand. Voor tijdsafhankelijke berekeningen zijn ook waarden voor de bergingsfactor per modellaag nodig.

In deze programma's kunnen door de opzet van het lagschema en de verdeling van de driehoekige elementen (EEM) of rechthoekige blokken (EDM) complexe situaties worden ingevoerd zoals:

- Topografische kenmerken
- Geologische structuren,
- Parameterwaarden met regionale of lokale variatie,
- Ondoorlatende elementen (wanden, breuken),
- Modelbegrenzingsen
- Randvoorwaarden:
 - Verdeling van de nuttige neerslag.
 - Voeding door onverzadigde zone en topsysteem (verharding en dergelijke).
 - Relatie met open water (kwel, infiltratie).
 - Voeding uit open water (getij, hoogwatergolf en dergelijke).

4.5.2 Beschikbare regionale grondwatermodellen

Bij Deltares zijn op basis van iMod regionale grondwaterstromingsmodellen aangemaakt, zoals MORIA (rivierengebied), IBRAHYM (Limburg), AMIGO (Oost Gelderland), MIPWA (Noord Nederland) en AZURE (Midden-Nederland), die gebruikt kunnen worden in het betreffende studiegebied. Deze modellen moeten intensief worden bestudeerd, alvorens deze te gebruiken voor toepassing van ontwerp van een drainagestelsel. Belangrijk is dat de resolutie van deze modellen 25 m is terwijl voor de berekeningen van waterkeringen een fijnere resolutie nodig is. Een punt van aandacht is de aanwezigheid van een drainageweerstand in poldergebieden of gerioleerde gebieden. Mogelijk moeten de regionale modellen verder worden aangevuld met detailinformatie.



In iMod is het mogelijk om de voeding van het grondwater vanuit het topsysteem en de onverzadigde zone te modelleren. Daarvoor wordt ModFlow gekoppeld met het programma MetaSwap. Meer informatie is te verkrijgen via de website van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium.

Grondwater modelinstrumentarium MORIA (Modellering Ondergrond Rivierenland Interactief en Actueel) is een van de regionale modellen. Dit instrumentarium is ontwikkeld voor het beheergebied van Waterschap Rivierenland. Het model is reeds regionaal geïkt en bevat de parameterwaarden voor de geohydrologische eigenschappen in het modelgebied en geeft zo inzicht in het regionale grondwatersysteem en biedt de mogelijkheid om effecten in beeld te brengen van toekomstige ruimtelijke of klimatologische ontwikkelingen. Dit instrumentarium sluit aan bij de opzet van de andere met iMOD werkende regionale modelinstrumenten zoals hiervoor vermeld. Het grondwatermodel van MORIA is ontwikkeld met ModFlow voor de verzadigde grondwaterstroming, gekoppeld met het onverzadigde zone model SIMGRO-MetaSWAP. Er is een iMOD-versie ontwikkeld van deze ModFlow-MetaSWAP combinatie, waarmee het eenvoudig mogelijk is om binnen iMOD modelruns uit te voeren. Zonder aanpassing van de modelinvoer is het mogelijk om het model op te schalen naar een grovere schaal, of om één of meer deelmodellen uit te knippen. Hierdoor kan het instrumentarium flexibel worden gebruikt voor zowel lokale detailstudies als regionale studies.

Het grondwatermodel van MORIA is verbeterd aan de hand van gemeten grondwaterstanden en stijghoogten, door stationaire en niet-stationaire ijking. De modelparameters zijn zodanig aangepast, dat de afwijking (het residu) tussen de berekende en gemeten grondwaterstand op de locaties van de grondwatermeetpunten zo klein mogelijk wordt. In MORIA3.x is het lagenmodel consistent gemaakt (waarbij kD-waarden consistent zijn met de laagdikten uit REGIS). Voor meer informatie wordt verwezen naar de rapporten over MORIA, zie (Deltares / TNO, 2008) en (Deltares, 2014).

Drinkwatermaatschappijen hebben eveneens grondwatermodellen ontwikkeld ten behoeve van het ontwerp van oeverfiltraatwinning. Een dergelijk model kan eveneens een goede basis zijn en kan worden uitgebreid of verfijnd ter plaatse van de te onderzoeken waterkering.

4.5.3 Stationaire en niet-stationaire ijking

Het uitvoeren van een ijking van een stationair model op de mediaan van de gemeten grondwaterstanden, van de geselecteerde meetpunten kan bijvoorbeeld leiden tot een aanpassing van de modelwaarden voor het doorlaatvermogen (kD) en de hydraulische weerstand (c).

Bij een niet-stationaire ijking worden bijvoorbeeld de elastische bergingscoëfficiënt, de drainageweerstand en de infiltratiefactor van watergangen en de infiltratieweerstand van rivieren aangepast.

Er is sprake van een geïkt model, wanneer een goede balans ontstaat tussen:

- De afwijkingen tussen metingen en modelsimulatie.
- De uiteindelijke parameterwaarden die passen bij het geohydrologische systeem.

Het voorkomen van grote afwijkingen tussen de berekende en gemeten grondwaterstand op de locaties van de grondwatermeetpunten kan twee soorten oorzaken hebben:



- De te ijken initiële modelparameters zijn niet nauwkeurig genoeg (dit levert wel aanpassingsruimte op).
- Het initiële model bevat nog onvolkomenheden en/of hiaten in de gehanteerde modelconcepten.

Bij het aantreffen van grote afwijkingen dient eerst gecontroleerd te worden op fouten in modelconcepten. In een perfect model zijn afwijkingen en parameteraanpassingen beide nul. Helaas is dit geen haalbaar doel, wel kan er software worden gebruikt die objectief een optimum zoekt tussen beide factoren, al moet het zoekalgoritme worden gevoed met subjectieve kentallen, zoals:

- Hoeveel gewicht hangen we aan de metingen?
- Hoeveel gewicht hangen we aan onze eigen kennis over de initiële modelparameters?
- Welke modelparameters willen we aanpassen?
- Hoe betrouwbaar zijn beschikbare resultaten van pompproeven?
- Hoe vertalen we gebiedskennis naar objectieve invoer?

Het ijken van grondwatermodellen dat normaliter op gemiddelde of GxG-waarden wordt gedaan, is vooral van betekenis voor regionale modellen, want daarmee worden veelal waterhuishoudkundige analyses verricht. Indien dergelijke modellen beschikbaar zijn (bijvoorbeeld regionale modellen zoals MORIA), kunnen deze een uitgangspunt vormen. De parametrisatie van het model is dan in ieder geval al onderzocht. De ijking van een geohydrologisch model in het kader van het ontwerpproces voor een dijkverbetering vereist echter bovendien nog een bijzondere aanpak. Bij de beoordeling van waterkeringen op GHW of MHW wordt namelijk uitgegaan van waterstanden op de rivier die 1x per jaar of 1x per (bijvoorbeeld) 10.000 jaar wordt overschreden. In het achterland kan dan ook een situatie voorkomen dat het polderwaterstelsel zeer hoge peilen heeft en het grondwater hoog staat. Bovendien wordt vooral gefocust op kritische dijkvakken met de maatgevende bodemopbouw volgens de SOS. Het model voor het ontwerp van drainagesystemen in dergelijke dijkvakken moet daarom een verbijzondering zijn van een regionaal model. Bij voorkeur wordt dan nog de reactie van een dergelijk deelmodel nagekeken en vergeleken met meetgegevens van een korte periode in het voorjaar met hoogwater, bij voorkeur een periode met GHW wanneer dat in de meetgegevens voorkomt. Zo mogelijk wordt het deelmodel daar niet-stationair op geijkt.

4.6 Van stijghoogten naar waterspanningen in het dijkprofiel

4.6.1 Aanpak

Behalve dat de schematisatie van de ondergrond moet zijn bepaald, moet worden nagegaan van welk dijkprofiel sprake is, een profiel met een zandkern of een met een klei-kade. De reactie van het grondwater in de kern van een waterkering op verandering van rivierpeil of neerslag is afhankelijk van de opbouw van de kern en daarmee van de wijze van versterking van de waterkering.

De indringingslengte is het deel van de laagdikte waarover aanpassing van de waterspanning in een slecht doorlatende klei- of veenlaag optreedt als gevolg van de plotselinge verandering van de waterspanning in een onder- of bovenliggende watervoerende zandlaag. De wijze waarop de bepaling van de indringingslengte moet worden verricht, is vermeld in bijlage b4.3 van het TRW. Daar is vermeld: De aanpassing van de waterspanningen u in een kleilaag aan een wijziging van de randvoorwaarden, bijvoorbeeld de waterspanning in een onderliggende,



watervoerende zandlaag, kan geruime tijd duren. Het aanpassingsproces wordt beschreven door de vergelijking voor eendimensionale consolidatie:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4.16)$$

Met als consolidatiecoëfficiënt:

$$c_v = \frac{k}{\rho g (m_v + n\beta)} \quad (4.17)$$

Waarin geldt:

- ρ_w = Soortelijk gewicht van water [kg/m^3].
- g = Zwaartekrachtversnelling [m/s^2].
- m_v = Samendrukbaarheid van de grond [m^2/N].
- n = Porositeit [-].
- β_w = Samendrukbaarheid van het water [m^2/N].

Globaal geldt:

- Voor zand $m_v = 10^{-8}$ à $10^{-7} \text{ m}^2/\text{N}$.
- Voor klei $m_v = 10^{-7}$ à $10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$.
- Voor water $\beta = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$.

De effectieve compressibiliteit van water in de grond kan echter veel groter zijn wanneer sprake is van luchtinsluitingen. Bij geohydrologen is de beschouwing van samendrukbaarheid en consolidatie minder bekend dan bij geotechnici. Geohydrologen beschouwen de grondwaterstroming in watervoerende of waterremmende lagen waarbij gebruik wordt gemaakt van de bergingscoëfficiënt S voor een laag met dikte D :

$$S = \rho g D (m_v + n\beta) \quad (4.18)$$

$$\text{ofwel } S = \frac{kD}{c_v} \quad (4.19)$$

De bergingscoëfficiënten van in Nederland voorkomende watervoerende zandlagen variëren van $S = 10^{-4}$ tot $3 \cdot 10^{-3}$, ook wel beschreven als een specifieke elastische berging in m^3/m^2 per meter stijghoogtetoeename. Met betrekking tot mogelijke schatting op basis van samendrukkingseigenschappen wordt opgemerkt dat niet de samendrukkingcoëfficiënt voor nieuwe belastingen, maar die voor herbelasting moet worden toegepast. Daarmee wordt dan de consolidatiecoëfficiënt in geval van herbelasting berekend.

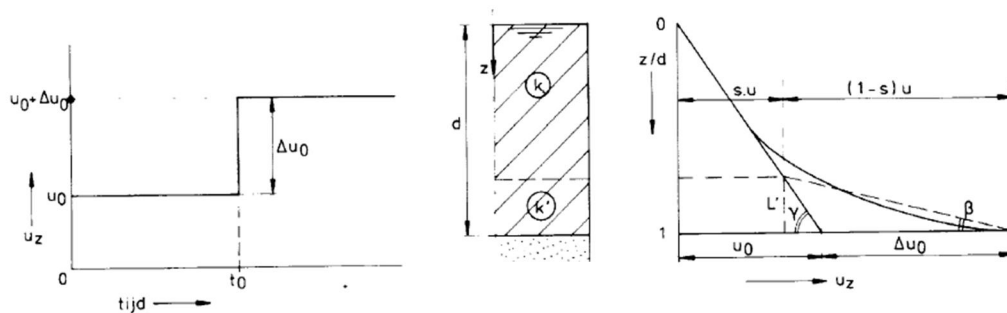
In de literatuur wordt ook wel de specifieke bergingscoëfficiënt S_s gepresenteerd. Dit is de bergingscoëfficiënt S per laagdikte D :

$$S_s = \frac{S}{D} \quad (4.20)$$

De waterspanningen in de waterremmende laag passen zich aan, aan de optredende toenemende stijghoogte in de watervoerende laag die het gevolg is van een hoogwatergolf op de rivier. Op enige laagdikte in de kleilaag is sprake van demping en vertraging.

Voor de bepaling van de waterspanning in het dijkontwerp moet bij de gegeven optredende buitenwaterstand, de karakteristieke stijghoogte in de watervoerende laag worden bepaald die met 95% zekerheid niet zal worden overschreden. De bepaling van deze karakteristieke waarde hangt samen met de gekozen geohydrologische eigenschappen, met name de spreidingslengte en bergingscoëfficiënt in de watervoerende laag.

In de bijlage b4.3 in de TRW (ENW, 2004) is op basis van een analytische oplossing een eenvoudige benaderingsmethode gegeven voor de aanpassing van de waterspanning u in een kleilaag aan een plotselinge wijziging van de waterspanning in een onderliggende zandlaag: de indringingslaag of kunstmatige leklaag. Het waterspanningsverloop in de diepte in een waterremmende laag op een bepaald tijdstip wordt benaderd door een stationair waterspanningsverloop, waarbij de laag opgebouwd wordt gedacht uit twee sub-lagen met verschillende doorlatendheden, k bovenin de laag en k' onderin de laag. De dikte van de onderste laag wordt bepaald door de mate van aanpassing (Figuur 4.16).



Figuur 4.16 Aanpassing van de waterspanning ten gevolge van een plotselinge wijziging in de onderliggende zandlaag.

De indringingslengte L' geldt voor de dikte van de laag die zich aanpast:

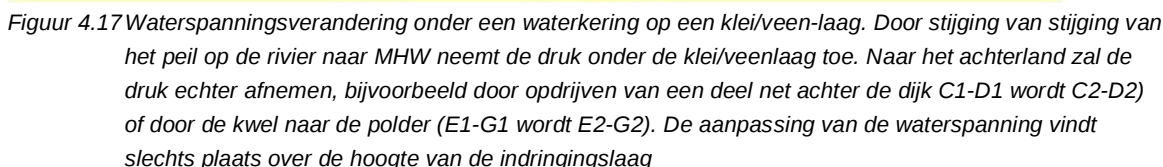
$$L' \approx 4\sqrt{c_v \cdot (t - t_0)} \quad (4.21)$$

De fictieve doorlatendheid k' van de onderste laag volgt uit:

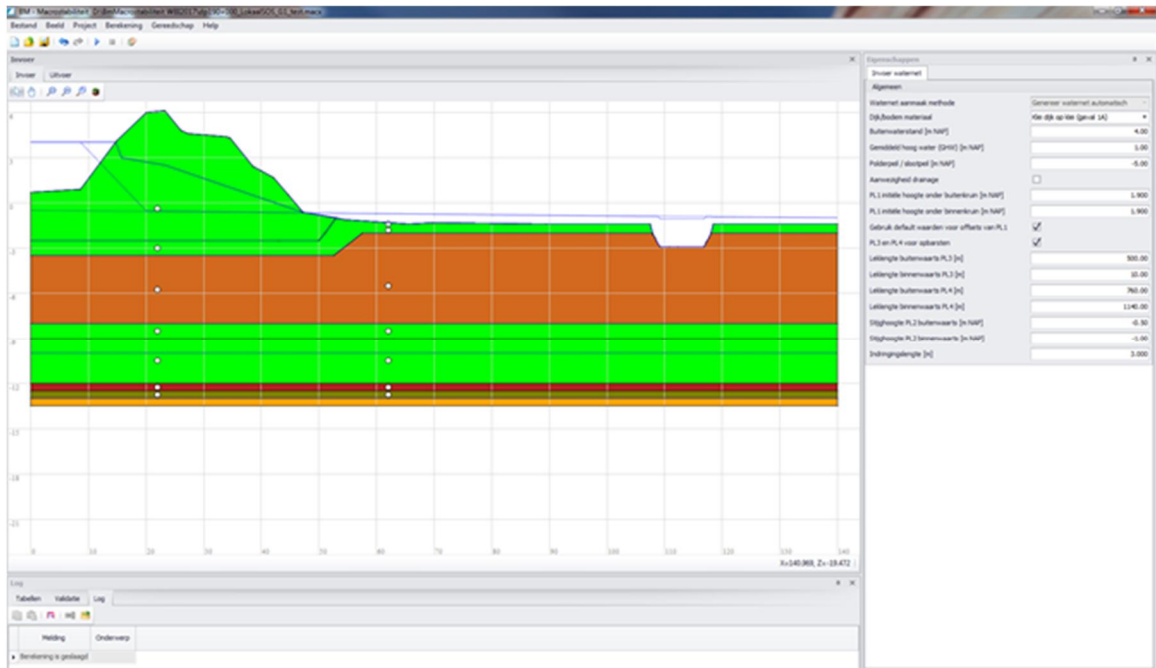
$$k' = \frac{k L' s}{D (1-s)} \quad (4.22)$$

Hierin is:

- k = De doorlatendheid van de klei [m/dag].
- L' = De dikte van de aanpassingszone [m].
- s = Het stationaire deel van de wateroverdruk [-].
- D = De dikte van de kleilaag [m].



80 van 160



Figuur 4.18 Invoerparameters in Waternet Creator (kader rechts) en grafische weergave

4.6.3 Uitwerking ten behoeve van ontwerp

Voor een ontwerp kan dezelfde aanpak worden gevolgd als in de beoordelingssystematiek. Deze werkwijze is dan wel een benadering van de werkelijk optredende situatie. Indien men nauwkeuriger de verdeling van de waterspanning in het dijklichaam wil bepalen, dan is een numerieke berekening met bijvoorbeeld PLAXIS noodzakelijk.



5 Ontwerpen drainage

5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het ontwerpproces van een drainagesysteem in een waterkering. In veel gevallen zal het drainagesysteem een deeloplossing zijn, waarbij aanvullende maatregelen aan de waterkering noodzakelijk zijn. De samenhang tussen de hydraulische belastingen (van het buitenwater), de geohydrologische analyse (hoofdstuk 4), het waterkeringsontwerp, de onderhoudsstrategie en de omgevingsaspecten moeten samen een ontwerp opleveren dat in ieder geval voldoet aan de eisen voor waterveiligheid, en dat waar mogelijk tegemoet komt aan de omgevingsaspecten. De afstemming tussen de verschillende disciplines is hierbij van groot belang voor een goed en efficiënt ontwerpproces.

Dit hoofdstuk gaat in op het ontwerpproces, keuzes die moeten worden gemaakt binnen dit proces en het omgaan met onzekerheden. Dit hoofdstuk beperkt zich tot drainagesystemen die de stijghoogte beïnvloeden. Uitgangspunt is dat de keuze voor een drainagesysteem al is gemaakt. Onderdelen van dit hoofdstuk kunnen echter ook worden gebruikt voor een globale probleemverkenning en dimensionering, die gebruikt kunnen worden bij de afweging voor een versterkingsalternatief.

In aparte Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijnen die naar verwachting in de loop van 2017 uitkomen en die zullen verschijnen in het kader van POV-Piping, wordt ingegaan op de nadere dimensionering van verschillende typen drainagesystemen: een bronneringsstelsel, een DMC-systeem en een grindkoffer.

5.2 Ontwerpproces

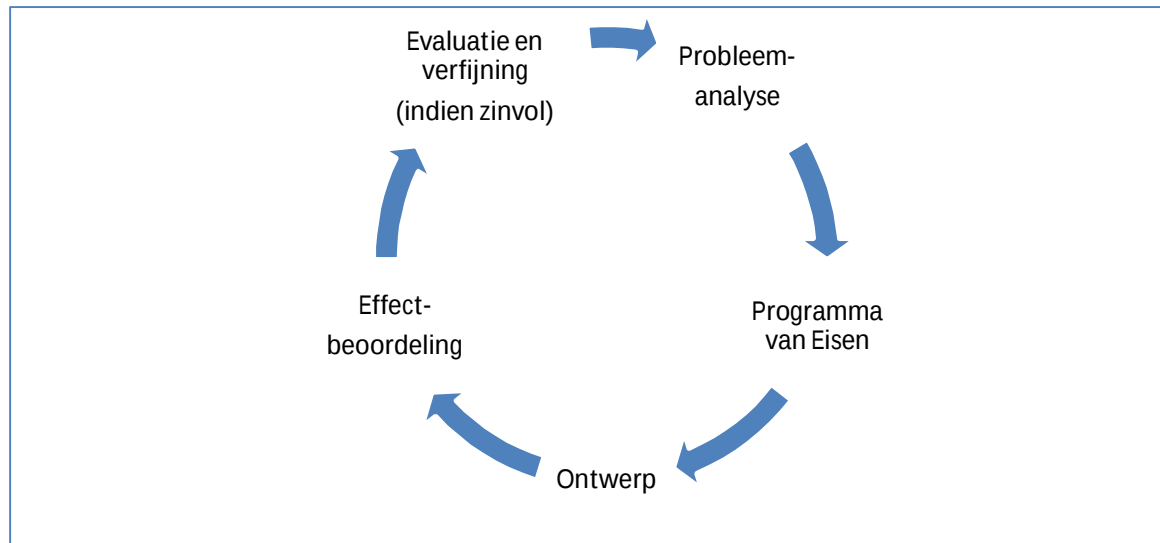
5.2.1 Algemeen ontwerpproces

Een aantal factoren speelt een rol bij de ontwerpkeuzes en daarom is het van belang om iteratief te werk te gaan. De werkwijze is om in verschillende ontwerpcycli van grof (globaal) naar fijn (meer gedetailleerd) te werken. Zie ook Figuur 5.1.

In algemene zin kunnen de volgende vijf stappen worden onderscheiden:

- a. Probleemanalyse. Een eerste stap is het in kaart brengen van de huidige situatie met bijbehorende problematiek. Veelal is dit al in een eerder stadium gedaan en kan voor het ontwerp van het drainagesysteem worden volstaan met een samenvatting van de relevante aspecten.
- b. Programma van Eisen. In een programma van eisen worden de randvoorwaarden en uitgangspunten voor het ontwerp van het drainagesysteem opgenomen.
- c. Ontwerp. Op basis van het Programma van Eisen wordt het ontwerp van het systeem nader uitgewerkt. De mate van detaillering is afhankelijk van de fase en de beschikbare gegevens.
- d. Effectbeoordeling. De effecten van het ontwerp op de omgeving worden bepaald en waar nodig beperkt.
- e. Evaluatie en verfijning. Na de effectbeoordeling wordt gekeken naar het behaalde resultaat en mogelijke optimalisaties in het ontwerp. Op basis hiervan wordt de volgende ontwerpcyclus ingegaan.

De effectbeoordeling is vooral van belang voor de afweging van varianten en wordt in dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten.



Figuur 5.1 De vijf stappen van het ontwerpproces

5.2.2 Ontwerpstappen drainagesysteem

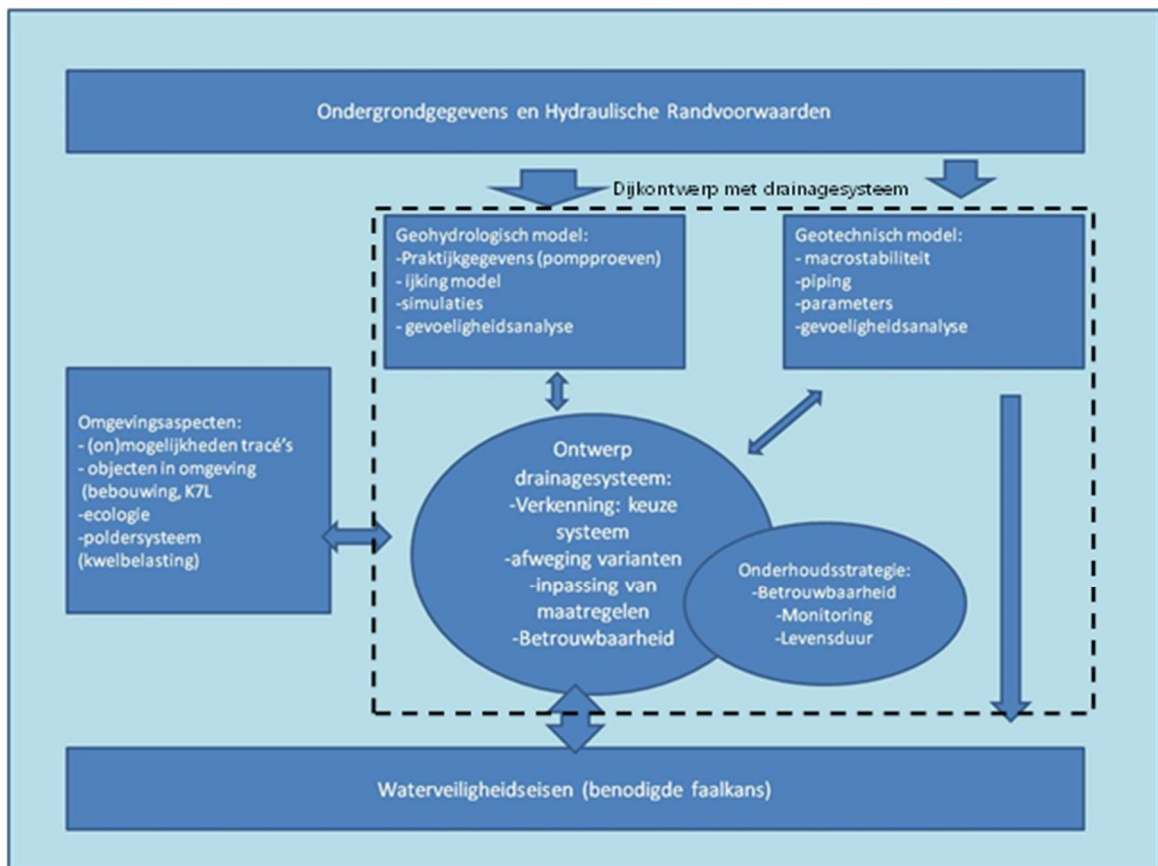
Een drainagesysteem moet zorgen voor een verlaging van de stijghoogte en zo een bijdrage leveren aan de geotechnische stabiliteit (behoud van macrostabiliteit en/of tegengaan van piping) van de waterkering. Het uiteindelijke ontwerp van de waterkering met een drainagesysteem moet voldoen aan de wettelijke norm en de daarbij gestelde kaders, onder andere WBI2017 en OI2014v4, en zoals uitgewerkt in hoofdstuk 3.

De wijze waarop de geohydrologische analyse wordt gemaakt staat beschreven in hoofdstuk 4. De wijze waarop de toelaatbare faalkans van het drainagesysteem bepaald dient te worden in het ontwerp staat in hoofdlijn beschreven in hoofdstuk 3 en is verder uitgewerkt in dit hoofdstuk. De wijze waarop de geotechnische berekeningen moeten worden uitgevoerd is beschreven in de Schematiseringshandleidingen voor Piping (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) en Macrostabiliteit (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2016b) en het Ontwerpinstrumentarium (Rijkswaterstaat, 2017).

Het komen tot een ontwerp waarbij wordt voldaan aan de betrouwbaarheidseisen met betrekking tot de geotechnische faalmechanismen is een iteratief proces, waarbij ook het falen van het drainagesysteem en de nauwkeurigheid van het monitoringssysteem dienen te worden meegenomen. In eerste instantie dient te worden bepaald:

- Welke systeemkeuzes en varianten mogelijk zijn.
- Wat per systeemkeuze en variant de hoogst haalbare geohydrologische waterstandsverlaging is.
- Wat de invloed van de waterstandsverlaging is op de geotechnische faalmechanismen.

Vervolgens kan het drainagesysteem worden ontworpen door te variëren in uitgangspunten. Een beeld van de afhankelijkheden tussen de ontwerpstappen is weergegeven in Figuur 5.2.

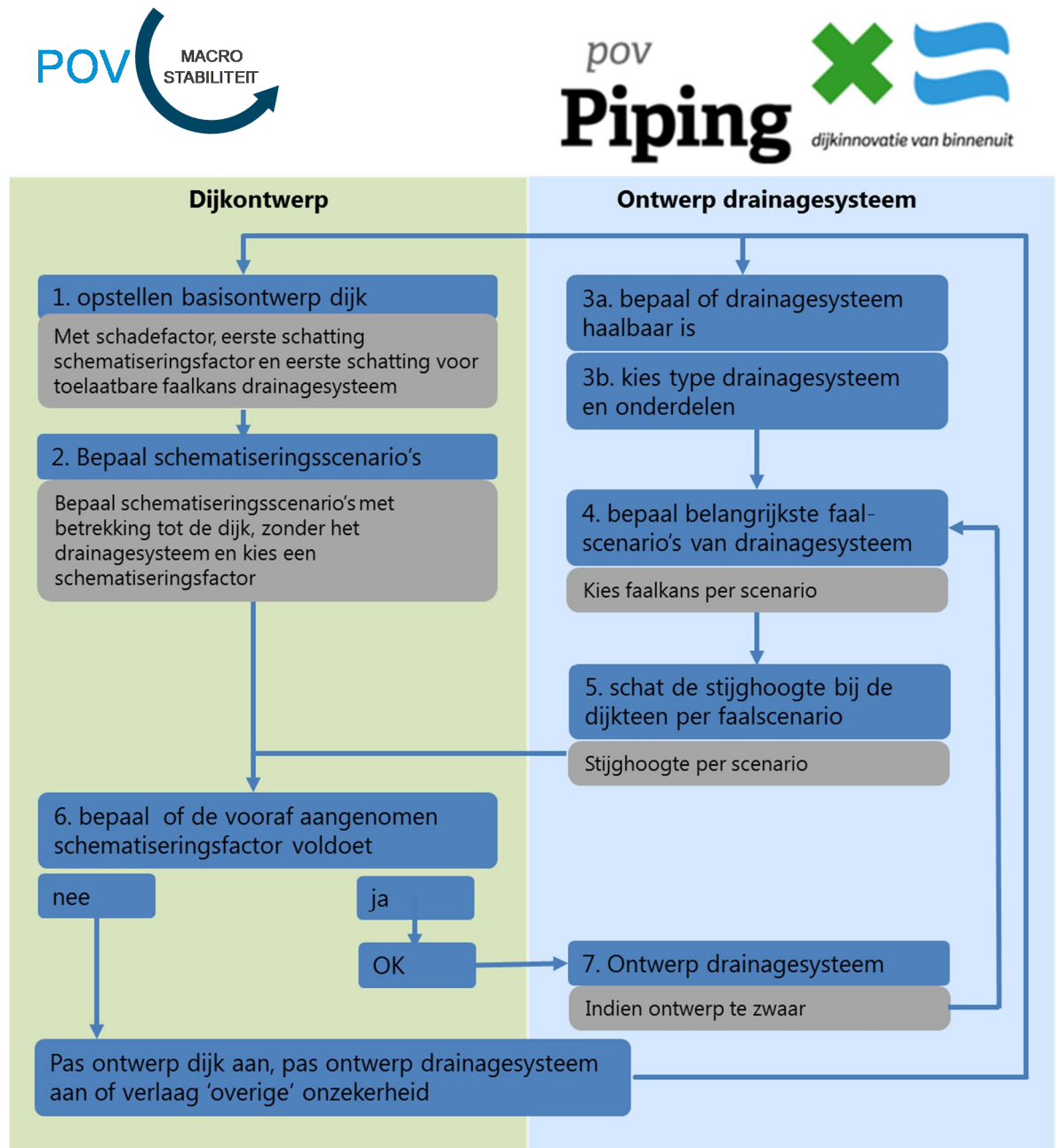


Figuur 5.2 Afhankelijkheden in het ontwerpproces

Het ontwerp van een drainagesysteem wordt bepaald door veel verschillende facetten die met elkaar samenhangen (Figuur 5.2). Vooral de relatie tussen de geohydrologie en de geotechniek is voor het ontwerpproces van een drainagesysteem van groot belang. Aspecten ten aanzien van de omgeving, de ondergrond en waterstanden vormen randvoorwaarden. Daarnaast speelt de betrouwbaarheid van het drainagesysteem, tevens in relatie tot de monitoring en onderhoud (Arcadis, 2010), een belangrijke rol om aan de eisen voor waterveiligheid te voldoen.

5.2.2.1 Ontwerpstappen

In dit hoofdstuk wordt vooral ingegaan op het ontwerpproces waarmee de balans moet worden gezocht tussen het geotechnisch ontwerp van een dijk en (de betrouwbaarheid van) een drainagesysteem, zie het met stippellijn omkaderde deel in Figuur 5.2. Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 introduceert een drainagesysteem nieuwe faalmogelijkheden voor een waterkering. Monitoring van het systeem en de stijghoogten vergroot juist weer de betrouwbaarheid. Deze bijdrage van het falen van het drainagesysteem aan de faalkans van een dijkontwerp kan worden meegenomen zoals onzekerheden traditioneel worden meegenomen in de schematiseringsfactor. De zeven stappen die doorlopen dienen te worden om te komen tot het ontwerp zijn weergegeven in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Stappenplan dijkontwerp met drainagesysteem

De volgende zeven stappen worden onderscheiden in het stappenplan:

1. Stel een basisontwerp op voor de dijk, uitgaande van de vereiste schadefactor en een aanname voor de schematiseringsfactor en een veilige waarde van de (berekende) stijghoogte, waarin de invloed van het drainagesysteem is meegerekend (paragraaf 5.4.1).
2. Bepaal de 'reguliere' onzekerheden in de schematisatie (geometrie, bodemopbouw, etc) inclusief de invloed op de veiligheidsfactor.
3. Kies een type drainagesysteem en de benodigde onderdelen (zodra duidelijk is dat een drainagesysteem een haalbare variant is).
4. Bepaal de belangrijkste faalkansscenario's van het drainagesysteem en kies een bijbehorende kans van voorkomen.
5. Schat de invloed op de veiligheidsfactor per faalkansscenario.
6. Bepaal de schematiseringsfactor, rekening houdend met deze scenario's en bepaal of het ontwerp voldoet aan de vereiste waarde. Hiervoor wordt het "rekenblokje" gebruikt. Afhankelijk van het faalmechanisme en de veiligheidsfactor (bv. stabiliteitsfactor of opbarstfactor) moet het corresponderende rekenblokje worden gebruikt.



7. Met de in stap 4 en 5 gekozen faalkansen van het drainagesysteem en de schattingen van de invloed per faalkansscenario wordt het drainagesysteem gedetailleerd. Hieruit kan blijken dat de gekozen waarden te streng zijn. In dat geval is bijstelling nodig en wordt teruggegaan naar stap 4. Ook is het mogelijk om andere onzekerheden te minimaliseren, en dan wordt dus naar stap 2 teruggegaan.

Bovenstaande methode komt grotendeels overeen met het stappenplan schematiseringsfactor (Arcadis, 2010), (ENW, 2012). De methode is echter meer gericht op het 'passen' van de faalkansruimte van het drainagesysteem binnen het waterveiligheidsvraagstuk, in plaats van het optimaliseren en onderbouwen van de ontwerpschematisatie. Daarnaast wordt er faalkansruimte bewust ingenomen door het drainagesysteem (als ontwerpkeuze en niet als schematiseringsonzekerheid). Het rekenblokje van de schematiseringsfactor (spreadsheet beschikbaar via de helpdesk water) kan worden gebruikt voor de analyse. De vertaling van de stabiliteitsfactor naar faalkans is hierbij afhankelijk van het (deel)faalmechanisme dat wordt beschouwd.

Een aantal beperkende voorwaarden geldt niet die wel een beperking vormen als het puur om een dijkontwerp met al zijn schematiseringsonzekerheden betreft. Zo wordt in de rapportage "stappenplan schematiseringsfactor" (Arcadis, 2010) aangegeven, dat een gesommeerde kans van voorkomen binnen een categorie niet groter dan 30% mag zijn. Ook wordt de schematiseringsfactor in het stappenplan gemaximeerd op 1,3; een grotere bijdrage van onzekerheden houdt in dat de basisschematisatie onvoldoende conservatief is uitgewerkt. Deze beperkingen kunnen worden losgelaten voor wat betreft de faalscenario's van het drainagesysteem en dus voor het ontwerp van het drainagesysteem.

Bovenstaande methodiek gaat ervan uit dat de faalkans van de waterkering wordt bepaald bij ontwerpomstandigheden (de waterstand behorende bij de norm), conform de kalibratie uit het WBI. Echter, in het geval van het toepassen van een drainagesysteem, kan het voorkomen dat juist een lagere waterstand (dus bij een hogere terugkeertijd) maatgevend kan zijn voor de dijk. Het is onduidelijk in hoeverre dit effect heeft op de faalkans van het ontwerp en daarom dient dit te worden nagegaan (witte vlek).

In het buitenland, bijvoorbeeld de Verenigde Staten, worden ook drainagesystemen toegepast. Informatie over het ontwerp van drainageconstructies is dan ook te vinden in (US Army Corps of Engineers, 1992).

5.2.2.2 Rekenvoorbeeld

In deze paragraaf wordt een gestileerd en versimpeld voorbeeld gegeven van de stappen die in de vorige paragraaf zijn voorgesteld. Het betreft een dijk waar opbarsten met voldoende zekerheid moet worden voorkomen.

Stap 1

Het betreft een normtraject met een signaleringswaarde van 1/10.000 per jaar en een lengte van 25 km. Hierbij hoort een veiligheidsfactor voor opbarsten $\gamma_{up} = 1,74$ (volgens het OI2014v4). Zonder maatregelen (de initiële toestand van het dijktraject) is de opbarstfactor bij een normale, veilige, schematisering 0,9 (zonder rekening te houden met partiële veiligheidsfactoren). Door het drainagesysteem moet de opbarstfactor dus van 0,9 naar 1,74 worden gebracht, nog zonder rekening te houden met schematiseringsonzekerheden of de faalkans van het drainagesysteem.



Stap 2

De volgende schematiseringsscenario's zijn benoemd:

1. Dit betreft het normale, veilige, ontwerp dat bij stap 1 is bepaald. De schematiseringsfactor is gelijk aan 1,3 gekozen.
2. Het gewicht van de deklaag is 10% minder groot. De opbarstfactor neemt hierdoor met 10% toe. De kans hierop wordt geschat op 15%.
3. Het maaiveldniveau is lokaal 0,3 m lager. De opbarstfactor neemt hierdoor met 15% toe. De kans hierop wordt geschat op 10%.
4. De stijghoogte kan door schematiseringonzekerheden hoger worden in de geohydrologische berekeningen. Zonder drainagesysteem is bepaald dat de stijghoogte 20% hoger kan zijn door diverse oorzaken. De kans hierop is geschat op 25%. De opbarstfactor neemt hierdoor toe met 20%. Het drainagesysteem beïnvloedt de stijghoogte echter direct en veranderingen in de stijghoogte zijn daarom afhankelijk van het drainagesysteem. Dit scenario wordt daarom vervangen door een scenario dat de invloed van het drainagesysteem weergeeft:
 - Door falen van het drainagesysteem, inclusief schematisering van de berekening van de stijghoogte, kan de stijghoogte 30% hoger worden. De opbarstfactor wordt daardoor 25% groter. Dit betreft verschillende scenario's, maar in deze stap worden deze nog als één scenario samengevoegd. De inschattingen van de gevolgen en kansen zijn een eerste grove benadering.

Het blijkt dat met deze scenario's het ontwerp ten aanzien van opbarsten voldoet aan de eis. In de volgende figuur is het ingevulde "rekenblokje" gegeven.

Opbarsten							
Ontwerpeis in termen van veiligheidsfactor, γ_{up}						1,74	
Betrouwbaarheidsindex bij $P_{eis,dsn}$						4,99	
$P_{eis,dsn}$						3,10E-07	
Keuze schematiseringsfactor ($\gamma_{b,u}$)						1,30	
Eis opbarstfactor in ontwerp (= $\gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u}$)						2,26	
Corresponderende β						5,56	
Corresponderende faalkans						1,38E-08	
Bijdrage ontwerpsschematisering aan faalkans						6,92E-09	
Si: Scenario i							
P(Si): kans op voorkomen scenario i							
$\Delta F_{up}(D;Si)$: verschil opbarstfactor tussen basisschematisatie en scenario i							
Si	P(Si)	$\Delta F_{up}(D;Si)$	Fup(D; Si)	β	Psf (D;Si)	Psf(D; Si) · P(Si)	Omschrijving scenario
1	0,5	0	2,265	5,555	1,38E-08	6,92E-09	Basisschematisering
2	0,15	-0,23	2,035	5,323	5,11E-08	7,67E-09	gewicht deklaag 10% lager
3	0,1	-0,34	1,925	5,202	9,87E-08	9,87E-09	lager maaiveldniveau
4	0,25	-0,57	1,695	4,925	4,22E-07	1,05E-07	stijghoogte hoger, incl. effect falen drainagesysteem P(s) volgt uit foutenboomanalyse drainagesysteem. Stijghoogte volgt uit geohydrologische berekening met falend drainagesysteem
5	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
6	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
7	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
8	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
9	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
10	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
Totale faalkans						1,30E-07	
						dit is	42%
van de toelaatbare kans							
indien dit kleiner dan 100% is, dan is de schematiseringsfactor ok							
schematiseringsfactor verhogen tot dit percentage < 100% is							
$\Delta F_{up}(D;Si)$ geeft toename van Fup(D) toeis bij aanname van scenario Si							

Figuur 5.4 Rekenblokje opbarstfactor Stap 2

De totale faalkans is 41% van de vereiste faalkans.



Stap 3 Bepaal drainagesysteem

Voor dit gestileerde voorbeeld is de keuze voor een bepaald type drainagesysteem niet wezenlijk van belang. Om enigszins herkenbare scenario's te benoemen is gekozen voor een bronneringssysteem dat bestaat uit een serie bronnen.

Stap 4 en 5 Bepalen van faalscenario's en invloed op opbarstfactor

In stap 4 worden scenario's benoemd in relatie tot het drainagesysteem die leiden tot een hogere stijghoogte en dus een lagere opbarstfactor. Evenals bij de gebruikelijke bepaling van de schematiseringsfactor, moeten de scenario's onafhankelijk zijn.

De stappen 4 en 5 zijn als volgt uitgewerkt waarbij scenario's 4 en 5 met enkele variaties zijn benoemd:

4. Door schematiseringonzekerheden in de berekening van de stijghoogte kan de stijghoogte te laag worden berekend. Er zijn verschillende variaties op de scenario's mogelijk, zoals de volgende die nader zijn benoemd als a, b en c:
 - a. De doorlatendheid van de watervoerende zandlaag is hoger.
 - b. De dikte van de watervoerende zandlaag is groter.
 - c. De respons is groter (indien niet-stationair wordt gerekend met een kleinere bergingscoëfficiënt). Omdat de scenario's onafhankelijk moeten zijn, wordt hiermee niet de invloed van de doorlatendheid of dikte van de watervoerende zandlaag bedoeld.

Deze scenario's zouden ook bij stap 2 al gedefinieerd kunnen zijn. De invloed op de stijghoogte is echter afhankelijk van het drainagesysteem en het ontwerp daarvan. Daarom worden deze scenario's hier benoemd en niet al bij stap 2. De invloed op de stijghoogte kan pas goed worden bepaald als het drainagesysteem is ontworpen. Controle bij stap 6 en 7 is daarom nog nodig.

5. Door falen van het drainagesysteem of onderdelen daarvan kan de stijghoogte te laag worden berekend. De volgende scenario's met variaties zijn daarom nader benoemd:
 - a. Het systeem faalt geheel. De kans hierop is, door goed beheer, gering en wordt geschat op 0,1%. De gevolgen zijn echter groot: de opbarstfactor halveert.
 - b. Eén bron faalt, door verstopping, leidingbreuk of het falen van een afsluiter. Dit zijn 3 afzonderlijke scenario's die onafhankelijk zijn. In deze berekening worden ze echter samengevoegd tot één scenario. De gevolgen zijn steeds gelijk en verdere detaillering vindt plaats bij het ontwerp van het drainagesysteem in detail. De kans voor het optreden van deze scenario's wordt vastgesteld op 10%. De gevolgen zijn afhankelijk van de invloed van de andere bronnen op deze locatie. Dat is afhankelijk van het ontwerp van het drainagesysteem. Aangehouden wordt dat de stijghoogte met 20% stijgt en de opbarstfactor met 15% daalt.

Ook hier geldt dat controle bij stap 6 en 7 nodig is

De scenario's 5a en 5b kunnen niet tegelijkertijd optreden en zijn dus niet onafhankelijk. Alleen het maatgevende scenario's hoeft te worden ingevuld voor het bepalen van de schematiseringsfactor.

Stap 6 Controleer schematiseringsfactor

In de volgende figuur is het rekenblokje weergegeven, waarin deze scenario's zijn ingevuld. Scenario 5a is maatgevend en daarom is scenario 5b niet meegerekend.



pov

Piping



dijkinnovatie van binnenuit

Opbarsten							
Ontwerpeis in termen van veiligheidsfactor, γ_{up}					1,74		
Betrouwbaarheidsindex bij $P_{eis,dsn}$					4,99		
$P_{eis,dsn}$					3,10E-07		
Keuze schematiseringsfactor ($\gamma_{b,u}$)					1,30		
Eis opbarstfactor in ontwerp (= $\gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u}$)					2,26		
Corresponderende β					5,56		
Corresponderende faalkans					1,38E-08		
Bijdrage ontwerp-schematisering aan faalkans					4,14E-09		
Si: Scenario i							
P(Si): kans op voorkomen scenario i							
$\Delta F_{up}(D;Si)$: verschil opbarstfactor tussen basisschematisatie en scenario i							
Si	P(Si)	$\Delta F_{up}(D;Si)$	$F_{up}(D; Si)$	β	$P_{sf}(D; Si)$	$P_{sf}(D; Si) \cdot P(Si)$	Omschrijving scenario
1	0,299	0	2,265	5,555	1,38E-08	4,14E-09	Basisschematisering
2	0,15	-0,23	2,035	5,323	5,11E-08	7,67E-09	gewicht deklaag 10% lager
3	0,1	-0,34	1,925	5,202	9,87E-08	9,87E-09	lager maaiveldniveau
4	0,1	-0,11	2,155	5,447	2,56E-08	2,56E-09	k-waarde zandlaag hoger
5	0,05	-0,23	2,035	5,323	5,11E-08	2,56E-09	dikte WBP groter
6	0,2	-0,23	2,035	5,323	5,11E-08	1,02E-08	respons groter
7	0,001	-1,13	1,135	4,053	2,53E-05	2,53E-08	drainagesysteem faalt geheel
8	0,1	-0,34	1,925	5,202	9,87E-08	9,87E-09	één bron faalt in dit geval niet maatgevend, daarom bijdrage niet meegerekend
9	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
10	0	0	2,265	5,555	1,38E-08	0,00E+00	
Totale faalkans						6,23E-08	
					dit is	20%	van de toelaatbare kans
							indien dit kleiner dan 100% is, dan is de schematiseringsfactor ok
							schematiseringsfactor verhogen tot dit percentage < 100% is
$\Delta F_{up}(D;Si)$ geeft toename van $F_{up}(D)$ tov eis bij aanname van scenario Si							

Figuur 5.5 Rekenblokje opbarstfactor stap 5

De scenario's die in stap 4 zijn benoemd zijn ontwerpeisen op basis waarvan het drainagesysteem ontworpen moet worden. De faalkansen die bij scenario 5a en 5b zijn benoemd zijn top-eisen in een foutenboom voor het drainagesysteem, of onderdelen daarvan. Uit het rekenblokje is af te lezen dat er nog enige ruimte in het ontwerp is: de faalkans is 20% van de eis. Deze ruimte kan worden opgebruikt door de faalkans van het gehele drainagesysteem, of van een enkele bron, aan te passen. Het kan echter geen kwaad om in het ontwerp enige reserve te laten voor (nog) onbekende scenario's.

Stap 7 Gedetailleerd drainagesysteem

In deze stap wordt het eigenlijke drainagesysteem ontworpen en gedetailleerd. Hier wordt in het vervolg van dit hoofdstuk op ingegaan.

De eisen waaraan het drainagesysteem moet voldoen zijn de aannamen voor de faalscenario's, kans van optreden per scenario en de invloed op de veiligheidsfactor, zoals in de stappen 4 en 5 is gedaan.

Het is mogelijk dat deze eisen te zwaar blijken te zijn: het drainagesysteem wordt te duur of is niet te realiseren. In dat geval worden de eisen in de stappen 4 en/of 5 bijgesteld. Ook kan het mogelijk zijn om andere onzekerheden, die in stap 2 zijn benoemd, te verkleinen. Het kan ook aan de orde zijn om over te gaan op totaal andere oplossingen voor de lokale problemen met de dijkstabiliteit.

5.3 Probleemanalyse

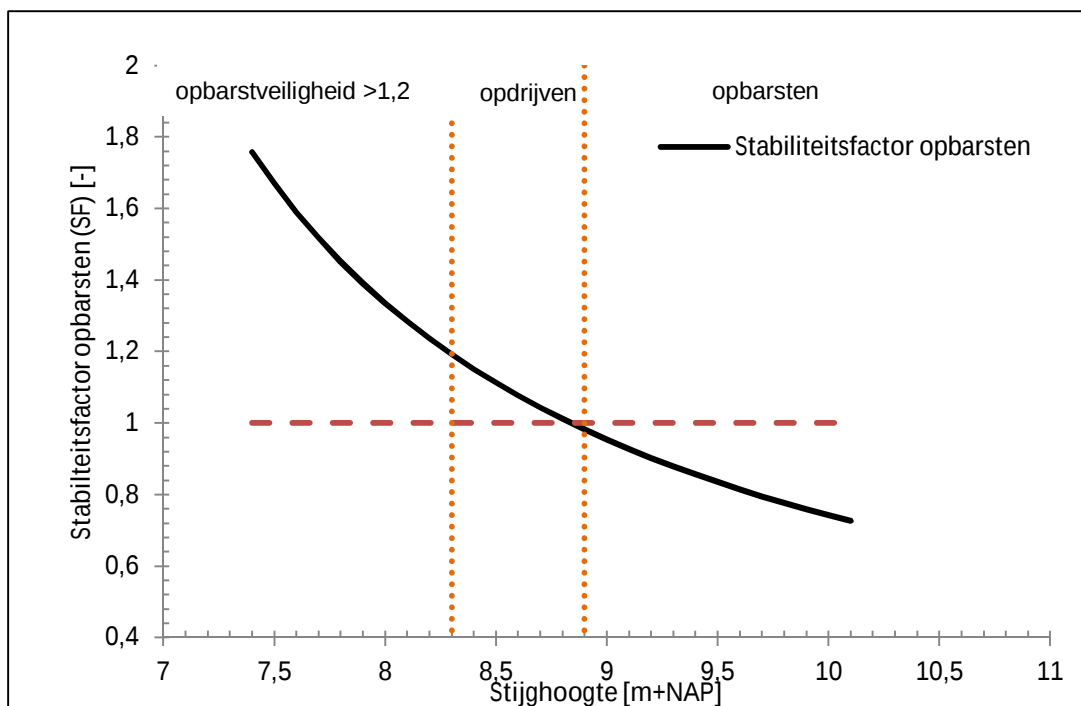
Onderdeel van de probleemanalyse is het in kaart te brengen van de nul-situatie. Aan de hand van een aantal berekeningen kan snel worden gezien wat een verlaging van de stijghoogte oplevert voor de veiligheidsfactor. Dit helpt bij het bepalen van de vereiste stijghoogteverlaging.



5.3.1 Piping

Voor het faalmechanisme piping, dient eerst te worden beschouwd wat maatgevend is: opbarsten of heave. De invloed van een verlaging van de stijghoogte op het al dan niet optreden van terugschrijdende erosie (piping) kan nog niet bepaald worden met de algemeen beschikbare rekenregels. Op dit moment kan een drainagesysteem daarom alleen worden ingezet om opbarsten of heave te voorkomen, en via die weg ook piping te voorkomen. In algemene zin kan worden gesteld dat het deelmechanisme heave bepalend kan zijn bij aanwezigheid van kwelschermen en relatief dikke deklagen van licht materiaal. Ook indien uittredepunten veroorzaakt worden door objecten als fundering, bomen, en dergelijk kan heave bepalend zijn. In andere gevallen moet eerst opbarsten optreden, voordat heave kan optreden; in deze gevallen is de faalkans voor opbarsten bepalend.

Een voorbeeld van de opbarstfactor uitgezet tegen de stijghoogte in de watervoerende zandlaag voor het faalmechanisme piping, deelmechanisme opbarsten, is weergegeven in Figuur 5.6. De grafiek is opgesteld aan de hand van een spreadsheet met berekeningen naar opbarsten, waarbij de stijghoogte is gevarieerd. In dit voorbeeld blijkt uit de grafiek dat de stijghoogte dusdanig kan worden verlaagd dat opbarsten (en dus ook piping) niet plaatsvindt.



Figuur 5.6 Voorbeeld grafiek sterkte piping (opbarsten) uitgezet tegen de stijghoogte

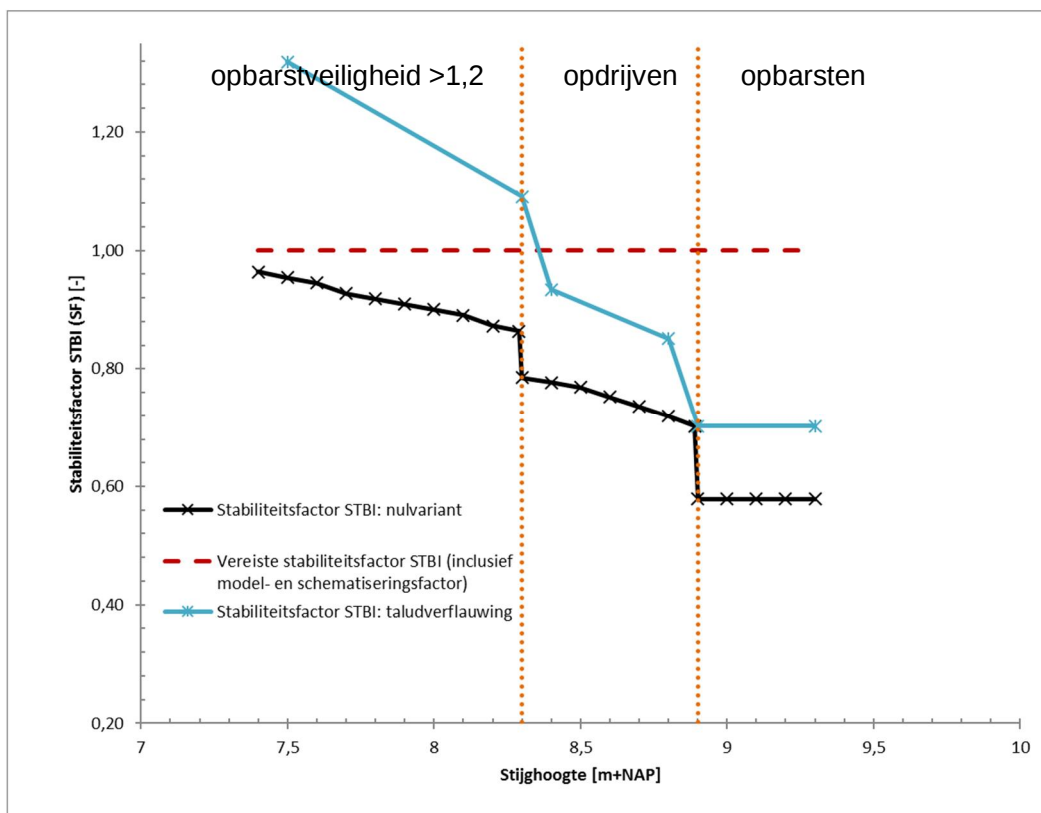
5.3.2 Macrostabiliteit

Voor het faalmechanisme macrostabiliteit kan een reeks stabiliteitsberekeningen worden uitgevoerd voor de nul-situatie, waarbij de stijghoogte wordt gevarieerd. De resultaten kunnen in een grafiek worden gepresenteerd door de stabiliteitsfactor voor STBI uit te zetten tegen de stijghoogte. Een stabiliteitsberekening is complexer dan een pipingberekening en daarom is deze grafiek minder vloeiend dan de grafiek voor piping. Bovendien vertoont de curve een aantal sprongen. Deze sprongen worden veroorzaakt door de overgangen van modelfactoren en schematisaties als gevolg van de opbarstveiligheid die volgt uit de analyse voor piping (opbarsten/opbarsten). Een voorbeeld van een dergelijke curve staat weergegeven in Figuur 5.7. Zoals uit de grafiek valt op te maken, is de stabiliteitsfactor minimaal indien opbarsten



optreedt; vanaf dit punt geval wordt de stijghoogte immers gelijk genomen aan de grenspotentiaal.

Op basis van de figuur kan worden bepaald of de stijghoogteverlaging afdoende is of dat er aanvullende maatregelen nodig zijn. In het geval van Figuur 5.7 geldt dat de nul-situatie niet kan voldoen aan de eisen voor macrostabiliteit binnenwaarts door uitsluitend een stijghoogteverlaging te realiseren. Voor deze locatie zijn aanvullende maatregelen nodig, zoals een taludverflauwing. In de figuur staat met de blauwe lijn de sterkte aangegeven inclusief taludverflauwing. Voor deze situatie is naast een taludverflauwing ook een drainagesysteem nodig dat een stijghoogte van circa 8,3 m+NAP kan realiseren. De faalkansbijdrage van het drainage systeem dient hierbij nog te worden beschouwd.



Figuur 5.7 Voorbeeld grafiek sterkte macrostabiliteit uitgezet tegen de stijghoogte

5.4 Vaststellen eisen aan drainagesysteem

5.4.1 Waterveiligheidseisen: benodigde stijghoogteverlaging

De faalmechanismen piping en macrostabiliteit binnenwaarts zijn beide afhankelijk van de stijghoogte binnendijks. Ze hebben dus een directe relatie met het ontwerp van het drainagesysteem. De verlaging van de stijghoogte kan daarom een bepalend effect hebben op het benodigde ruimtebeslag en/of de benodigde lengte van de kwelschermen.

Voor het ontwerp van een drainagesysteem in een waterkering is het daarom belangrijk om goed in beeld te hebben wat de invloed is van de stijghoogte op de faalmechanismen. De sterktegrafieken geven de stijghoogteverschillen per mechanisme weer en moeten worden opgesteld aan de hand van geotechnische berekeningen van de nul-situatie. In bovenstaande paragrafen is beschreven hoe dit werkt voor piping en macrostabiliteit binnenwaarts.



5.4.2 Levensduur

Het drainagesysteem dient te worden ontworpen met een bepaalde levensduur. De levensduur van een drainagesysteem hangt nauw samen met het beheer en onderhoud en deze eisen dienen in samenhang te worden vastgesteld. De levensduur van de afzonderlijke elementen, de mogelijkheden om elementen te vervangen spelen ook een rol, evenals uitbreidbaarheid en verwachte autonome ontwikkelingen in het gebied. Het is verstandig om enige reserve in het ontwerp te houden als een wens bestaat voor toekomstige uitbreidbaarheid of onzekerheden in het systeemontwerp resulteren die door optimalisatie in de praktijk moeten worden ingevuld.

Voor een drainagesysteem kan een LCC analyse gedaan worden om de optimale levensduur af te leiden. Het is mogelijk om voor bepaalde onderdelen een kortere levensduur toe te staan, bijvoorbeeld als ze eenvoudig zijn te vervangen. Een dergelijke aanpak kan kosten besparen, als daarmee de keuze voor dure componenten kan worden voorkomen. Ook is het mogelijk om een flexibel systeem te ontwerpen, dat meegroeit met veranderende ontwerpwaterstanden of eisen.

5.4.3 Omgevingseisen

5.4.3.1 *Ontvangend watersysteem*

Het toepassen van een drainagesysteem heeft gevolgen op het ontvangende watersysteem. Voor de analyse van dit aspect is het van belang om vast te stellen hoe lang de periodes zijn dat het drainagesysteem zal werken, bij voortduring of alleen bij hoogwater. Het lozen kan ongewenste effecten met zich mee brengen; bijvoorbeeld op de waterkwaliteit of op de capaciteit van het watersysteem. In het getijdegebied speelt zoute kwel hierbij ook een rol.

Het lozen van grondwater op oppervlaktewater kan de waterkwaliteit dusdanig beïnvloeden dat dit gevolgen heeft voor de ecologie van het watersysteem. Deze mogelijke effecten dienen tijdig in beeld te worden gebracht, zodat bij het ontwerp daar rekening mee kan worden gehouden.

Ook de beschikbare berging en/of capaciteit van het ontvangende watersysteem kan aanleiding zijn om eisen te stellen aan het lozen van drainagewater:

- Enerzijds aan de piekbelasting (natte situaties).
- Anderzijds aan de totale (jaarlijkse) belasting van het watersysteem.

Een drainagesysteem kan leiden tot een toename van het water dat naar de polder wordt afgevoerd. Als dit frequent gebeurt, dan moet bij de inrichting van het watersysteem daar rekening mee worden gehouden en zullen compenserende maatregelen getroffen moeten worden.

5.4.3.2 *Waterbeheersing*

Door het drainagesysteem wordt kwelwater afgevangen dat zonder drainagesysteem voor een deel elders, op natuurlijke wijze, aan het oppervlak zou komen. Het systeem zorgt daarom voor beheersing van het kwelwater en kan daardoor wateroverlast voorkomen. Voor enkele van de drainagesystemen die in de jaren '90 van de vorige eeuw zijn aangelegd, was dit zelfs een belangrijke nevendoelstelling. Inventarisatie van wateroverlast en het aanwezige (geo)hydrologische systeem is daarom ook aanbevolen. Dat geldt zeker ook voor al aanwezige drainagemiddelen, die door aanleg van een nieuw systeem wellicht een andere functie krijgen of kunnen vervallen.



5.4.3.3 *Bebouwing en fundering*

Het toepassen van een drainagesysteem kan gevolgen hebben voor de grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden. Dit kan ongewenste effecten met zich mee brengen op de aanwezige bebouwing in de omgeving. Een lagere grondwaterstand als gevolg van het drainagesysteem, kan namelijk leiden tot funderingsproblemen. Gebouwen die op staal gefundeerd zijn, kunnen schade ondervinden als gevolg van ongelijkmatige zettingen. In het geval van een houten paalfundering, kunnen paalkoppen droogvallen en kan een probleem gevormd worden door paalrot. Het is daarom van belang om - indien van toepassing - tijdig inzicht te krijgen in het type fundering van aanwezige bebouwing. Als het systeem alleen verhindert dat extreme stijghoogten optreden en het geen verlagende invloed heeft onder dagelijkse omstandigheden, dan speelt dit aspect een verwaarloosbare rol.

5.4.3.4 *Kabels en leidingen*

De aanwezigheid van bebouwing en kabels en leidingen kan van invloed zijn op de mogelijke tracés van een drainagesysteem. Voorafgaand aan het ontwerpproces dienen bebouwing en kabels en leidingen in kaart te zijn gebracht. Bij het beschouwen van de varianten en de keuze van het systeem dient daar rekening mee te worden gehouden.

5.4.4 Gebruikerseisen: Beheer en onderhoud

De beheerder van een drainagesysteem (in veel gevallen het waterschap) stelt mogelijk eisen aan het beheer van het systeem. Deze eisen kunnen mogelijk beperkend werken op de systeem- of variantenkeuze en dienen daarom in een vroeg stadium in beeld te worden gebracht. Te denken valt aan eisen als bereikbaarheid, bijvoorbeeld geen haakse bochten in leidingen om toegang voor inspectie en reiniging te vergemakkelijken, toegang tot leidingen voor inspectie op afstanden van maximaal 250 m, benodigde inspanning, beheerkosten, en dergelijke. Ook praktische zaken zoals afdekking van putten spelen hierbij een rol.

Een belangrijke relatie is aanwezig tussen het onderhoud van een drainagesysteem en de werking / betrouwbaarheid van het systeem. De onderhoudsstrategie is daarom niet alleen vanuit de gebruiker belangrijk, maar ook vanuit de waterveiligheidsbenadering (zie Hoofdstuk 3). Monitoring kan hierbij een belangrijke rol spelen. De nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en controleerbaarheid zijn daarbij van groot belang.

Bij een drainagesysteem spelen beheer en onderhoud, waaronder ook monitoring wordt verstaan, een veel grotere rol dan bij klassieke oplossingen zoals bermen, en daarom is het van belang om de organisatie van de beheerder van de waterkering, die verantwoordelijk is voor beheer en onderhoud, al tijdens het ontwerpproces te betrekken. Inspanningen die nodig zijn ten aanzien van beheer en onderhoud moeten in de levenscycluskosten in beeld gebracht worden.

Eisen om goed onderhoud en monitoring mogelijk te maken moeten integraal worden meegenomen. Een voorbeeld hiervan is een minimale diameter van de leiding en een goede toegankelijkheid van de putten.

5.5 Omgaan met onzekerheden

5.5.1 Algemeen

Bij een dijkontwerp is het noodzakelijk om onzekerheden in de schematisatie in rekening te brengen door middel van een schematiseringsfactor. Bovendien worden onzekerheden in de modellen meegenomen in een modelfactor. Ook de onzekerheid met betrekking tot de werking van het drainagesysteem kan op deze manier worden meegenomen. Dit betreft



enerzijds de onzekerheid in de modellering van de stijghoogte en anderzijds de onzekerheid in de werking van het drainagesysteem. Voor onzekere aspecten kan ook gericht monitoring worden opgezet, opdat vervolgens bij de latere beoordeling een update mogelijk is van een deel van de onzekerheden zoals die zijn meegenomen bij de bepaling van de schematiseringsfactor. Bij het ontwerp is het verstandig om na te denken over de robuustheid of veerkracht van het systeem. Een ontwerp dat in zijn geheel faalt door het falen van één component is geen goed doordacht ontwerp.

Ook kan het waardevol zijn om bij het ontwerp rekening te houden met toekomstige ontwikkelingen door het ontwerp uitbreidbaar/adaptief te maken.

5.5.2 Modelonzekerheid - geohydrologische modellen

De modelonzekerheid in de geohydrologische berekening wordt bepaald door de bandbreedte van de gevoelige parameters in het geohydrologische model te bepalen. Het geohydrologische model wordt doorgerekend met de extremen van de bandbreedte. De spreiding in modelresultaten wordt meegenomen in de analyse. In een semi-probabilistisch dijkontwerp moet worden gerekend met de karakteristieke stijghoogte die met 95% zekerheid niet zal worden overschreden, gegeven de optredende buitenwaterstand. De relaties tussen de stabiliteits- en opbarstfactor en de faalkans die in het OI2014v4 zijn gegeven, zijn daarmee geijkt. Op basis van de gevoeligheidsanalyse dient een voldoende conservatieve inschatting te worden gemaakt van de parameters in het model die van belang zijn. Wanneer de spreiding te groot is, kan het drainagesysteem niet worden ontworpen aangezien de karakteristieke stijghoogte dan te hoog moet worden aangenomen.

Om de spreiding in de modelresultaten (en hiermee de karakteristieke stijghoogte) te reduceren kan met veldwerk of door een aanvullende modelinspanning de onzekerheid in de gevoelige parameters worden verkleind, zodat de spreiding in modelresultaten afneemt. Tijdens de ontwerpfase moet wel verificatie plaatsvinden, bijvoorbeeld door middel van een gevoeligheidsanalyse, of een dergelijke werkwijze tot een succesvolle realisatie zal leiden. Een andere mogelijkheid is het meenemen van de spreiding van de modelresultaten bij het ontwerpen van het drainagesysteem. Dit kan gedaan worden door bijvoorbeeld een brede(re) range aan onttrekkingsmiddelen mee te nemen. Tijdens de realisatie worden de gerealiseerde delen van het drainagesysteem beproefd, en wordt het definitieve aantal onttrekkingsmiddelen vastgesteld. Het uiteindelijke ontwerp en het systeem "as built" is dan gebaseerd op waarnemingen.

5.5.3 Werking drainagesysteem

Het falen van een drainagesysteem dient bij het ontwerp te worden meegenomen in de vorm van een scenario - of beter gezegd door scenario's – om de onzekerheden in de stijghoogte in rekening te brengen.

Onder het falen van het drainagesysteem wordt verstaan: *"het falen of verminderd functioneren van het drainagesysteem of een onderdeel van het systeem, met als gevolg een toename in de stijghoogte ten opzichte van een drainagesysteem dat functioneert zoals bedoeld"*.

Het drainagesysteem kan falen als gevolg van:

- Een bedienings- of aansturingsfout.
- Het constructief falen van één van de fysieke onderdelen van het drainagesysteem.
- Een verminderde werking als gevolg van achterstallig onderhoud.



- Een beperking in de lozing van het systeem.

Bij het ontwerp dienen de belangrijkste faalkansscenario's te worden meegenomen, rekening houdend met:

- Zowel scenario's met een grote kans van voorkomen en een beperkte invloed op de stijghoogte.
- Als scenario's met een kleine kans van voorkomen, maar een zeer grote invloed op de stijghoogte.
- Gecombineerde kansen van gelijktijdig falen van verschillende cruciale onderdelen in het systeem (uit de analyse bij het ontwerp moet blijken dat deze kansen dermate klein zijn, dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein wordt).

Het is van belang om falende onderdelen te beschouwen die zich binnen het invloedsgebied van de te beschouwen dijkdoorsnede bevinden. Er wordt immers ontworpen en beoordeeld aan de hand van betrouwbaarheidseisen die gelden voor dwarsdoorsneden van de dijk.

5.5.4 Adaptief ontwerp

Bij het ontwerp van een drainagesysteem is het zinvol om rekening te houden met onzekerheden over toekomstige ontwikkelingen, zodat het systeem te zijner tijd kan worden aangepast aan gewijzigde uitgangspunten. Rekening kan worden gehouden bijvoorbeeld door ruimte te reserveren voor een extra grote inspectieput zodat in de toekomst een extra pomp kan worden bijgeplaatst. Ook door het meenemen van overdimensionering van de afvoercapaciteit van bepaalde leidingen en door extra capaciteit van de bron kan rekening worden gehouden met een toekomstige uitbreiding van het systeem.

Onzekerheden in de werking van het systeem in de praktijk (prestaties wijken af van de modellen) kunnen ook worden ondervangen door middel van een dergelijk adaptief ontwerp, zie ook paragraaf 5.5.1.

Een adaptief ontwerp kan ook worden gebruikt om mee te groeien met stijgende belastingen. Er wordt in dat geval bij de initiële aanleg met een relatief korte planperiode rekening gehouden en zodra het nodig is wordt het systeem uitgebreid. Een goede afweging op basis van life cycle costs (LCC) is nodig om de investering te optimaliseren.

5.6 Ontwerp drainagesysteem

5.6.1 Algemeen

In de paragrafen 5.3, 5.4 en 5.5 is ingegaan op het bepalen van eisen en randvoorwaarden voor het ontwerp. In deze paragraaf wordt ingegaan op het drainagesysteem zelf.

Naast de voorliggende Technische Richtlijn worden drie aparte richtlijnen opgesteld waarin ingegaan wordt op enkele specifieke systemen (namelijk een bronneringssysteem, een DMC-systeem (Dijk Monitorings- en Conditioneringssysteem) en een grindkoffer). De rapporten komen tot stand in het kader van de POV-Piping. In het voorliggende rapport wordt alleen ingegaan op algemene ontwerpkeuzes die ten grondslag liggen aan een drainagesysteem.



5.6.2 Keuze systeem

Een afweging dient gemaakt te worden welk systeem toegepast gaat worden (horizontaal / verticaal of een grindkoffer). Deze afweging is afhankelijk van verschillende factoren:

- Geohydrologische parameters, zoals het doorlaatvermogen van de tussenzandlaag.
- De aanwezigheid van een watergang.
- De dikte van de deklaag.
- De grondwaterkwaliteit.
- Ruimtelijke inpasbaarheid (boven en ondergronds).

5.6.3 Faalkansanalyse drainagesysteem

Het is van belang om de faalkansscenario's van het drainagesysteem dusdanig te kiezen, dat hiermee met een beperkte inspanning het grootste deel van de faalkans van het drainagesysteem in beeld kan worden gebracht. Het is van belang om in ieder geval de volgende scenario's mee te nemen:

- Het falen van cruciale constructieonderdelen in de nabijheid van de teen.
- Het falen van de uitstroomvoorziening.
- Onderdelen met weliswaar een beperkte invloed op de stijghoogte, maar ook een relatief lage betrouwbaarheid. Bijvoorbeeld een verminderde werking als gevolg van dichtslibbing.

In veel gevallen zal een beperkt aantal goed doordachte scenario's (of clusters daarvan) volstaan om het grootste deel van de faalkansbijdrage als gevolg van een falend drainagesysteem in beeld te hebben. Het is van belang om hier conservatieve keuzes in te maken. De faalkansbijdrage van het drainagesysteem is onderdeel van de ontwerp-opgave: door een sterk en robuust drainagesysteem te ontwerpen wordt de faalkansbijdrage kleiner en kan het gehele dijkontwerp worden geoptimaliseerd.

5.6.3.1 Decompositie systeem

Voor het drainagesysteem dient een faalkansanalyse opgesteld te worden door het systeem te decompuneren en per onderdeel faalmechanismen te benoemen en te kwantificeren. Toepassing van het drainagesysteem verlaagt de faalkans voor de waterkering. Echter, de faalkans van de het drainagesysteem zelf moet ook worden bepaald. Voor de faalkansanalyse is het van belang onderscheid te maken tussen de individuele componenten (de bronnen) en het collectieve systeem (het afvoerstelsel).

Het drainagesysteem bestaat uit diverse onderdelen en is:

- Passief: met een overloop die gaat werken zodra de stijghoogte van het grondwater een drempelniveau overschrijdt, met afvoer van het vrijkomende grondwater onder vrij verval;
- Actief automatisch: met een pomp die wordt aangeschakeld zodra de grondwaterdruk een alarmwaarde overschrijdt, en opgepompt grondwater afvoert via een afvoerleiding;
- Deels handmatige bediening van afsluiters, overlopen of pompen.

Een passief drainagesysteem kan uit verschillende componenten bestaan:

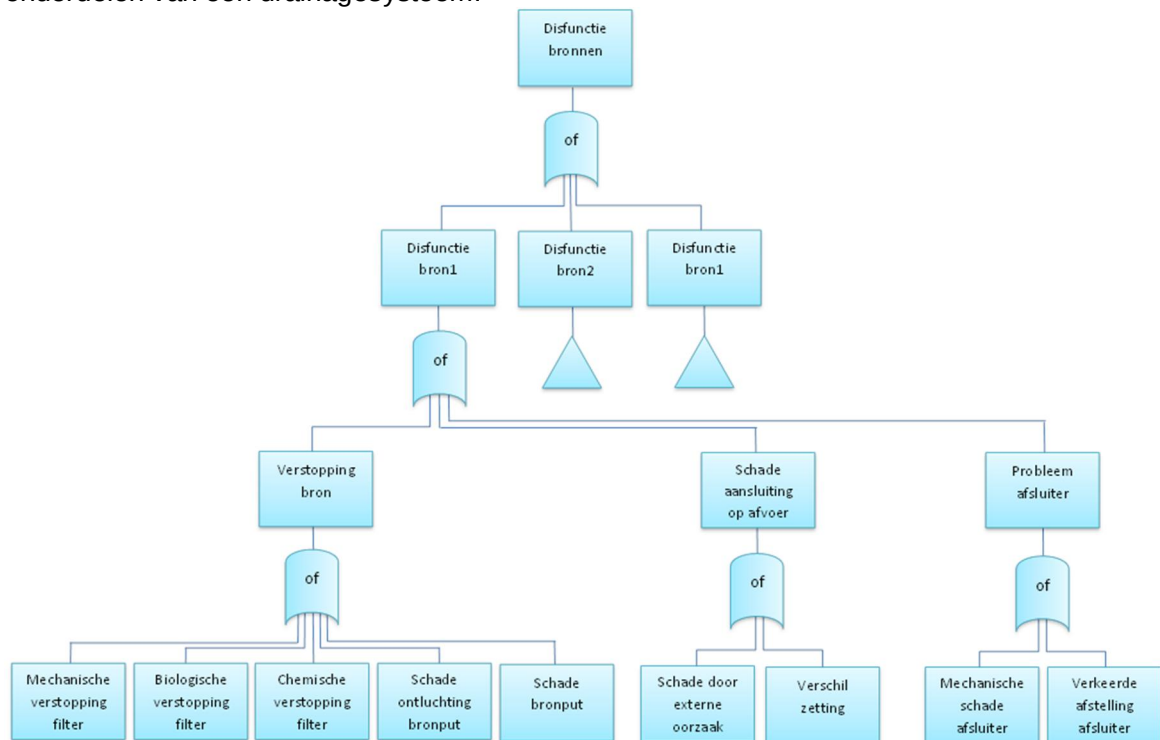
- Winmiddel: filter, drain, grindkoffer.
- Verbindende leidingen.
- Inspectie- en overstortputten.
- Doorspuitpunten (ten behoeve van onderhoud).
- Afsluiters van leidingen (ten behoeve van onderhoud).

Indien een actief drainagesysteem wordt toegepast, komen daar nog de volgende componenten bij:

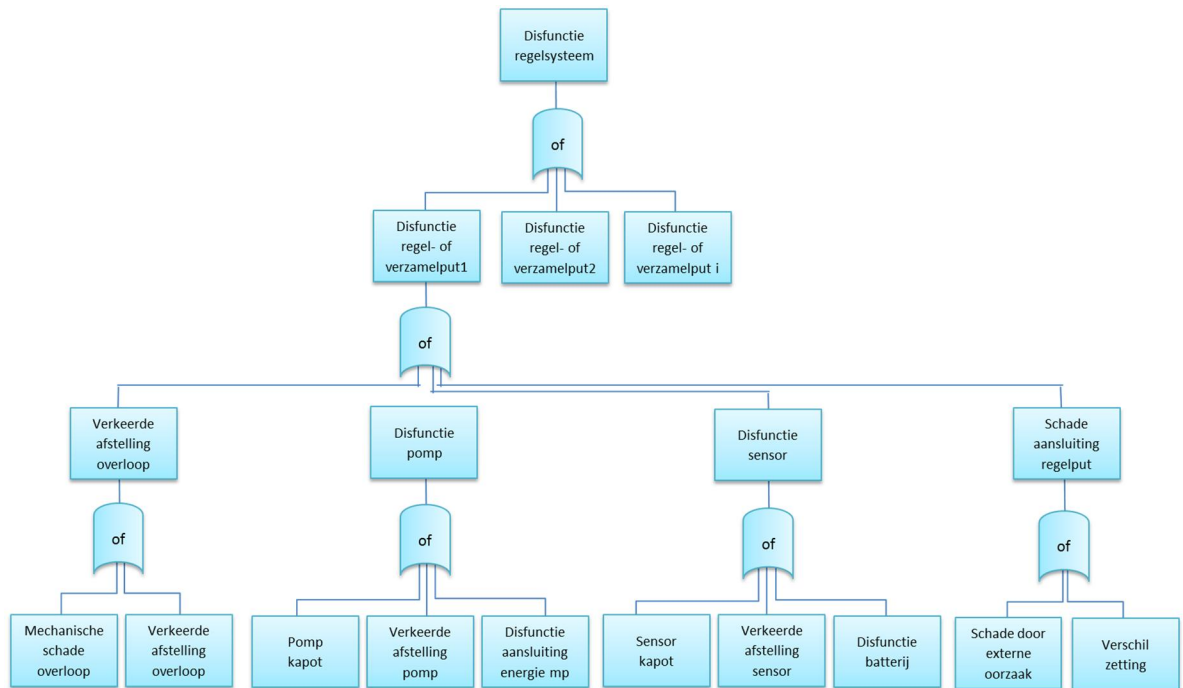
- Een pomp.
- Een drukopnemer of peilbuis met sensor om de pomp aan te schakelen.
- Een regelsysteem dat de sensorpuls vertaalt naar aanschakeling van een elektrisch circuit dat de pomp aanstuurt.
- Een stroomvoorziening.

Indien menselijke acties nodig zijn direct voorafgaande aan hoogwater om het systeem in te schakelen of te controleren, dan speelt ook de betrouwbaarheid van de procedures een rol.

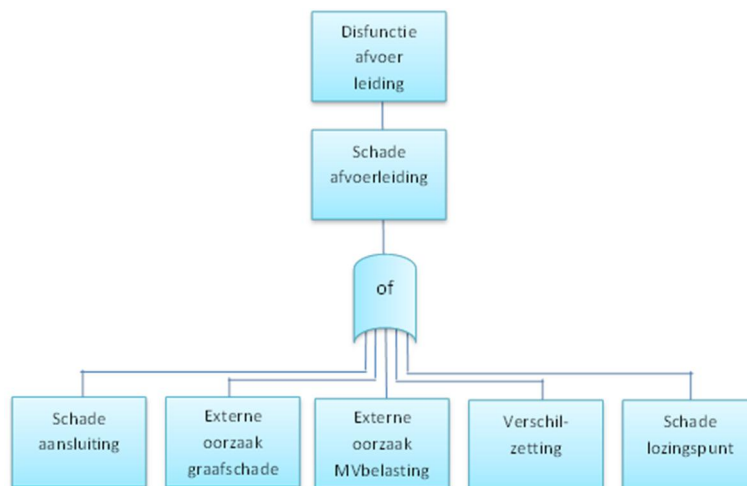
In de volgende drie afbeeldingen is een opzet gegeven van foutenbomen voor verschillende onderdelen van een drainagesysteem.



Figuur 5.8 Voorbeeld foutenboom "falen onttrekkingsmiddelen"



Figuur 5.9 Voorbeeld foutenboom "falen regelsysteem"



Figuur 5.10 Voorbeeld foutenboom "disfunctie afvoerleiding"

5.6.3.2 Faalmechanismen

Het falen van een onderdeel kan te wijten zijn aan diverse oorzaken die elk tot falen (of verminderde werking) van het systeem kunnen leiden. De faalmechanismen van de onderdelen moeten bij het ontwerp worden geïnventariseerd. De faalmechanismen zijn bijvoorbeeld:

- Constructief falen.
- Beschadigd raken door externe oorzaken.
- Menselijke bedieningsfouten.
- Zandafzetting in leidingen.
- Stroomstoring.



- Falen door gebrek aan inspectie en onderhoud:
 - Verstopping van filters.
 - Vastlopen mechanische componenten.
 - Ontregeling van meetinstrumenten (waardoor ijkingen en/of inmetingen niet meer kloppen).

Naast bovengenoemde faalmechanismen van de onderdelen, kan het systeem als geheel falen als gevolg van een beperking van de lozing; bijvoorbeeld als gevolg van een hoog polderpeil ter plaatse van het lozingspunt kan een passief systeem niet lozen, of pas bij een te hoge stijghoogte.

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op het constructief falen van het systeem zijn:

- Verticale vervormingen (ongelijkmatige zettingen en bodemdaling). Er kunnen verschilzettingen optreden in het leidingsysteem omdat een bronbuis star in het zand gefundeerd staat en de verzamleiding zich in de zettingsgevoelige laag bevindt die door het gewicht van de waterkering aan zakking onderhevig zal zijn.
- Horizontale vervormingen van het drainagesysteem (bijvoorbeeld bij ophoog- of graafwerkzaamheden).

5.6.3.3 *Risico's*

Naast bovengenoemde faalmechanismen, zijn een aantal beheersbare risico's te onderscheiden ten aanzien van het functioneren van een drainagesysteem:

- Verstopping van filters door dieren / planten.
- Luchtopsluiting.
- Bevriezing.
- En dergelijke.

Bovenstaande risico's zijn te beheersen door middel van het doorvoeren van aanpassingen in het ontwerp en door gericht beheer en onderhoud:

- Opnemen van roosters in afvoer en openingen (om verstoppingen tegen te gaan).
- Ontluchtingsgaten.
- Periodiek onderhoud.
- Inspectie bij samenvallend hoogwater en zware vorst inclusief een plan voor herstelmaatregelen.

5.6.4 Individuele faalkansen onderdelen systeem

Voor de faalkansanalyse is het van belang om een goede inschatting te maken van de kans op falen van de betreffende onderdelen. Voor de constructieve onderdelen is het van belang om dit te bepalen met behulp van een constructeur. Handreikingen hiervoor worden gegeven in de bouwvoorschriften/Eurocode. Voor leidingen in de nabijheid van waterkeringen zijn voorschriften ten aanzien van de sterkte van toepassing. In de literatuur zijn faalfrequenties van leidingmateriaal te vinden, zoals NEN 3651 (NEN, 2012) en (NEN, 2003). Ook bij gespecialiseerde bedrijven en waterwinbedrijven is informatie voorhanden. Een indicatie van faalscenario's op hoofdlijnen is samengebracht in Tabel 5.1.



Onderdeel	Constructief falen	Beschadiging door externe oorzaken	Bedieningsfouten	Stroomstoring
Winmiddel, filter, drain, grindkoffer	X			
Verbindende leidingen	X			
Inspectie en overstortputten	X			
Doorspuitpunten		X	X	
Afsluiters			X	(X)
Pomp			X	X
Drukopnemer of peilbuis met sensor			(X)	X
Regelsysteem				X
Stroomvoorziening				X
Uitstroomvoorziening				X

Tabel 5.1 Indicatie faalscenario's op hoofdlijnen

Ten aanzien van de constructieve veiligheid; door overdimensionering kan een lagere faalkans worden toegekend. Om een hogere veiligheid te vinden, kan in het ontwerp gekozen worden voor een kwalitatief hoogwaardig materiaal, zoals PE i.p.v. PVC.

5.6.5 Vergroten betrouwbaarheid drainagesysteem

De betrouwbaarheid van het systeem kan op verschillende manieren worden vergroot:

- Robuust ontwerp.
- Inspectie en monitoring.
- Regelmatig onderhoud.

5.6.5.1 Robuust Ontwerp

Een aantal faalkansscenario's is te ondervangen of te minimaliseren door hier in het ontwerp rekening mee te houden:

- Overdimensionering van leidingdiameters (verkleinen faalkans).
- Verzamelleiding lager dan aansluiting bron (opvangen zettingen).
- Koppelen van functies waardoor falen van een onderdeel niet (of in een beperkte mate) leidt tot falen van het drainagesysteem.

5.6.5.2 Inspectie en Monitoring

Bij inspectie en monitoring spelen onder andere:

- Jaarlijkse inspectie.
- Signalering van hoge waterstand in bronnen.
- Menselijke bedieningsfouten minimaliseren (draaiboeken, oefeningen, protocollen).
- Nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en controleerbaarheid van de metingen.



- Vaststellen van benodigd onderhoud.
- Bijstellen van de onderhoudsstrategie.

Het menselijk falen, werkt in de faalkans dominant door. Voor menselijke fouten (Afsluiter bij bron dicht i.p.v. open, verkeerde afstelling in een verzamelput) gelden relatief hoge kansen (bijvoorbeeld 1.10^{-3} per onderhoudsmoment (met een lage kans vanwege hantering van een protocol). Om dit punt en ook het systeem als geheel te verbeteren, kan monitoring met een actieve signalering worden toegevoegd. Dit kan een signalering in de bronbuis en in de overstortput zijn. De automatische signalering heeft ten tijde van hoog water het effect dat falen van onderdelen momentaan worden geregistreerd i.p.v. na de periodieke inspectie.

Voor het opstellen van foutenbomen, maatregelen benoemen om faalkansen te verlagen en om de foutenbomen te kwantificeren is specialistische inbreng op dit gebied noodzakelijk. In dit hoofdstuk is slechts de hoofdlijn geschetst.

Momenteel wordt gewerkt aan een aanbeveling over life cycle monitoring. Naar verwachting komt binnenkort het rapport beschikbaar (Koelewijn & van der Meer, in press).

5.6.5.3 *Regelmatig onderhoud*

De beschrijving van de benodigde planmatige onderhoudsstrategie is opgenomen in hoofdstuk 7.

6 Realiseren, testen en verwijderen

6.1 Uitvoeringsaspecten

Een drainagesysteem zal veelal in een bebouwde omgeving worden aangelegd, beheerd en onderhouden. Hoewel een drainagesysteem snel kan worden aangelegd en er met licht materiaal kan worden gewerkt, ervaren bewoners de aanleg, beheer en onderhoud mogelijk als overlast wanneer dit plaatsvindt in de eigen tuin. In sommige gevallen zal een diepe sleuf moeten worden gegraven, en zal in de aanlegfase de tuin behoorlijk worden aangetast. Het is belangrijk om in het omgevingsproces een eerlijk beeld te schetsen over dergelijke consequenties. Eventuele schade moet worden hersteld.

Voor elk onderdeel van een drainagesysteem is het vereist om in een zogenaamd paspoort met de gegevens (as built) op te nemen van de uitvoering. Deze gegevens betreffen bijvoorbeeld de boorstaat, de filterstelling, de ligging van leidingen en de dieptes. Deze informatie is relevant voor het beheer en voor het uitvoeren van een latere toetsing.

De aanleg van een drainagesysteem zal in principe alleen plaatsvinden als de stijghoogte lager is dan maaiveld, anders zijn mogelijk voorzieningen nodig om opbarsten te voorkomen. Dit is een belangrijk aandachtspunt voor drainagesystemen waar het buitenwater door het getij wordt beïnvloed.

Achtereenvolgens komen de verticale bron, een horizontale drain en een grindkoffer aan bod. Tijdens het graven van sleuven dienen aanwezige kabels en leidingen gemonitord en beschermd te worden.

6.1.1 Verticale bron

Verschillende boortechnieken zijn beschikbaar voor het installeren van verticale bronnen. Tijdens het ontwerpproces moet de keuze van de juiste techniek zorgvuldig gemaakt worden, zodat goed presterende bronnen worden geïnstalleerd. Een relevant overzicht van beschikbare technieken is opgenomen in (KWR, 2011) paragraaf 6.3. Uit de beoordeling blijkt dat zuigboren / luchtliften en puls boren de meest gangbare technieken zijn. De BRL 2100 en protocol 2101 stellen eisen aan mechanisch boren. Zo moet bijvoorbeeld aandacht worden geschonken aan het afdichten van scheidende bodemlagen in de ondergrond.



Figuur 6.1 Links: plaatsen verticale bron (foto: Mos), rechts: aanleg verzamelleidingen in Jaarsveld (foto: HDSR)



Ter plaatse van iedere verticale bron is tijdens de aanleg een minimale werkruimte vereist van circa 3x3 m² wanneer een booropstelling op rupsbanden wordt gebruikt. Een grotere werkruimte geeft een snellere aanleg en een mogelijke verlaging van de kosten. Een voorbeeld van het plaatsen van een verticale bron met behulp van een booropstelling op rupsbanden is weergegeven op de linker foto van Figuur 6.1. Ook voor beheer en onderhoud is een werkruimte van minimaal circa 3x3 m² vereist.

Om schade aan bebouwing te voorkomen geldt als veilige afstand tot bebouwing een vuistregel van tienmaal de diameter van het boorgat. Deze afstand bedraagt dan ongeveer vijf meter. In situaties waar de afstand tot naastgelegen objecten minder dan tienmaal het boorgat bedraagt, of daar waar de werkruimte beperkt is, kan van deze boormethode worden afgeweken door gebruik te maken van een casing (mantelbuis). De stalen casing fungeert dan als steun voor het boorgat.

Naast de aanleg van de bronnen zijn ook werkzaamheden vereist voor de aanleg van de aanvullende voorzieningen (zoals verzamelleiding, overlaat en lozingspunt). De rechterfoto van Figuur 6.1 geeft een impressie van de uitgevoerde werkzaamheden in Jaarsveld voor de verzamelleidingen. De vereiste werkzaamheden voor aanleg laten zich vergelijken met de aanleg van riolering en zijn daarom niet verder uitgewerkt.

6.1.2 Horizontale drain

Een overzicht van beschikbare aanlegtechnieken van de drain staan vermeld in Tabel 6.1. Een drain wordt altijd voorzien van doorspuitpunten, om de drain te kunnen onderhouden, en een lozingspunt.

Techniek	Aanbrengen filtermateriaal mogelijk	Indicatie maximale aanlegdiepte (m - MV)	Opmerking
conventionele sleuf ontgraving	ja	omvang sleuf kan beperkend zijn	opbouw filterconstructie is in-situ zichtbaar aandacht voor vereist ruimte beslag bij diepe ontgraving
sleufloos via v-ploeg	nee	1,5	bodem van de sleuf wordt niet ontgraven, maar grond wordt alleen opgetild waardoor ruimte voor drain ontstaat
kettinggraver	ja	6,0 - 8,0	maakt verticale sleuf
gestuurde boring (HDDW ⁶)	ja	geen beperking	geen werkzaamheden vereist daar waar het systeem de stijghoogte moet verlagen, maar wel bij in- en uittredepunt, ook tijdens beheer- en onderhoudsfase. Aandacht voor versmeren van boorgatwand door boring en/of steunvloeistof want dit vermindert de drainerende werking
boring of	ja	geen	vereist aanleg van een kostbare

⁶ Horizontal Directional Drilled Well

Techniek	Aanbrengen filtermateriaal mogelijk	Indicatie maximale aanlegdiepte (m - MV)	Opmerking
persing vanuit een schacht		bepierking	startschacht waarbinnen boring of persing kan plaatsvinden

Tabel 6.1 Beschikbare technieken voor de aanleg van horizontale drainage

Twee voorbeelden (een v-ploeg en een kettinggraver) van de wijze waarop een drainage wordt aangelegd staan afgebeeld in Figuur 6.2. De vereiste werkzaamheden voor de aanleg zijn algemeen van aard en zijn daarom niet verder uitgewerkt.



Figuur 6.2 Links: Aanbrengen drainage via v-ploeg (foto Barth drainage), rechts: aanbrengen drainage kettinggraver (foto: Boersma drainage)

6.1.3 Grindkoffer

Bij de aanleg van een grindkoffer moet een volume aan grond worden ontgraven dat overeenkomt met het volume van de grindkoffer. De onderkant van de grindkoffer moet direct aansluiten op de zandlaag van het relevante watervoerende pakket. Bij uitvoering moet dan ook worden geverifieerd of het de zandlaag volledig is aangesneden. Een tijdelijke bemaling is nodig als het ontgravingsniveau lager is dan de waterstand in het buitenwater.

Een nauwkeurige uitvoering is belangrijk. De verschillende zand- en grindlagen dienen correct aangebracht te worden. Van het installeren van de grindkoffer onder de inlaatconstructie van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld zijn foto's gemaakt (Figuur 6.3). De grindkoffer zorgt hier voor een verticaal evenwicht totdat de inlaatconstructie wordt geopend en de hoogwatergeul mee stroomt met de IJssel.



Figuur 6.3 Installeren grindkoffer bij Project Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld, Combinatie IJsselweide (Boskalis en Van Hattum en Blankevoort)

6.2 Testen van functioneren drainage

6.2.1 Wanneer testen

Het testen van een drainagesysteem maakt onderdeel uit van de uitvoeringsfase. Uit de test blijkt of de capaciteit van het aangelegde drainagesysteem in overeenstemming is met het ontwerp. Zo niet, dan moet het drainagesysteem worden uitgebreid.

Voor een mogelijke uitbreiding dient het ontwerp voldoende robuust te zijn. Als uitbreiding niet mogelijk is, dan zijn aanvullende maatregelen nodig om aan de waterveiligheidsopgave te voldoen. Aanvullende maatregelen bestaan bijvoorbeeld uit het uitbreiden van het drainagesysteem met pompen of de (gedeeltelijke) aanleg van een pipingberm.

Het regulier testen van het drainagesysteem maakt onderdeel uit van het beheer en onderhoudsplan (hoofdstuk 7). Bij het opstellen van dit plan, kan worden gekozen hoe het drainagesysteem wordt getest, bijvoorbeeld:

- Door een continue monitoring van het systeem, waarbij het optredende functioneren en de aanwezige meetpunten zodanig zijn dat een conclusie over het functioneren kan worden getrokken.
- Door een regelbaar systeem tijdens een hoogwater situatie te laten functioneren, ondanks dat dit voor de waterveiligheid niet vereist is, en zo via monitoring een conclusie over het functioneren te trekken.
- Door het uitvoeren van periodieke specifieke testen.

6.2.2 Mogelijke testen

Testen die mogelijk zijn, zijn afhankelijk van het type drainagesysteem. Voor drie typen drainagesystemen zijn mogelijke testen op een rij gezet in Tabel 6.2. Vervolgens wordt een korte uitwerking gegeven van iedere test.

Mogelijke testen	Verticale bron	Horizontale drain	Grindkoffer
continue test	toepasbaar	toepasbaar	toepasbaar
bepaling specifiek debiet	toepasbaar	deels toepasbaar	niet toepasbaar
camera inspectie	toepasbaar	toepasbaar	niet toepasbaar

Tabel 6.2 Mogelijke testen per type drainagesysteem

6.2.2.1 Continue test

De prestatie van het drainagesysteem kan worden beoordeeld door waarnemingen te analyseren en gebruik te maken van een grondwatermodel. Om de benodigde data te



verkrijgen is continue monitoring van het drainagesysteem gewenst. De mate waarin een conclusie uit de metingen kan worden getrokken, is afhankelijk van:

- De dichtheid van het monitoringsnetwerk (in ruimte en tijd⁷).
- De hydrologische omstandigheden tijdens de meetperiode in vergelijking met de ontwerpomstandigheden, omdat een meetperiode met een hoogwatergolf van bijvoorbeeld 1:10 jaar waardevollere informatie geeft dan een meetperiode met een hoogwater golf van bijvoorbeeld 1:1 jaar. Dit komt doordat bij een hogere hoogwatergolf een significantere verandering van de stijghoogte optreedt, dan is de invloed van het buitenwater op de stijghoogte beter waarneembaar. Daarnaast moet rekening worden gehouden met het ontwerp van het drainagesysteem: bij een 1:1 jaar hoogwater vindt mogelijk nog geen afvoer plaats doordat de drempelwaarde (vast afvoerniveau) of moment van inzet (regelbaar system) nog niet wordt overschreden.

6.2.2.2 Specifiek debiet verticale bron

Een verticale bron kan bij uitstek worden getest door het specifieke debiet te meten tijdens een onttrekking met een onderwaterpomp. Een dergelijke test biedt een gecontroleerde uitvoering per bron en de test kan ook eenvoudig periodiek herhaald worden.

De test kan alleen worden uitgevoerd als de stijghoogte beneden de bovenzijde van de bron staat, omdat alleen dan de bron kan worden geopend. De afvoerleiding van de bron moet worden afgesloten om te voorkomen dat de test verstoord wordt doordat water via de afvoerleiding de bron in stroomt. Het systeem in Opijnen is op deze wijze deels beproefd in februari 2016.

Een brondiameter van minimaal 160 mm wordt aanbevolen zodat makkelijk een onderwaterpomp kan worden ingebracht. Bij grotere diameters en filterlengte (circa > 10 m) kan ook een flowmeting worden gedaan om de volumestroom bijdrage over de diepte waar te nemen.

6.2.2.3 Specifiek debiet horizontale drain

Een horizontale drain kan in theorie op eenzelfde wijze worden beproefd als een verticale bron, door water uit de drain te onttrekken. Via een flow meting kan voorafgaand aan de proef worden bepaald of de gehele drain een bijdrage levert aan de optredende verlaging. Dit is afhankelijk van de lengte van de drain, de grondwaterstand boven de drain en de afvoercapaciteit van de drain en de pomp.

6.2.2.4 Camera inspectie

Drainageleidingen en afvoerleidingen kunnen met behulp van een camera worden geïnspecteerd. Hiervoor kan materieel worden gebruikt dat ook voor rioleringsinspecties wordt toegepast. Inspectie kan alleen plaatsvinden als de stijghoogte onder maaiveld ligt, omdat anders de bronnen niet kunnen worden geopend. Het drainagesysteem in Opijnen is in maart 2015 en februari 2017 deels geïnspecteerd.

6.3 Einde levensduur

Het einde van de levensduur van een drainagesysteem kan verschillende oorzaken hebben, bijvoorbeeld door een te kleine capaciteit, het einde van de technische levensduur of door gewijzigde uitgangspunten. Wanneer de capaciteit van een drainagesysteem de reden is voor

⁷ Als voorbeeld zijn op Schouwen bij elke grindkoffer 2 raaien met elk minimaal 2 peilbuislocaties geïnstalleerd om het functioneren van het systeem in de tijd te monitoren.



vervanging, dan wordt aangeraden om eerst goed te onderzoeken of regeneratie van de huidige drainagemiddelen of een uitbreiding van het systeem een optie is.

Verstopingen in drainagemiddelen kunnen diverse oorzaken hebben:

- Mechanische blokkade (door gronddeeltjes).
- Chemische neerslag (kalk, ijzer), dit kan ook plaatsvinden door convectie en doordringing via een put in zuurstofloze lagen, (Bonte, Wols, Maas, & Stuyfzand, 2017).
- Biochemische neerslag (bacteriële slijmvorming).
- Ingroei van wortels of verstopping van afvoerleidingen (mechanische beschadiging door werk op maaiveld, ongedierte).

Bij een einde van de levensduur kunnen de verticale bronnen worden verwijderd. De vrijkomende ruimte moet vervolgens zorgvuldig worden opgevuld met ondoorlatend materiaal; bijvoorbeeld zwelklei of bentoniet. De horizontale leidingen kunnen ook worden verwijderd, of eventueel worden dicht geschuimd. Bij het einde van de levensduur van een grindkoffer kan het grind worden ontgraven en een herbestemming worden gegeven. Het vrijgekomen volume kan worden opgevuld met grond, waarbij de doorsneden deklaag wel met klei moet worden afgedicht.



7 Beheren, Beoordelen en Onderhouden

7.1 Inleiding

Het beheer omvat het totaal van activiteiten om te waarborgen dat de functies van de waterkering kunnen worden vervuld en bijvoorbeeld gebaseerd op de Leidraad Kunstwerken (TAW, 2003) (hoofdstuk 6), dus ook voor een drainagesysteem. De eerste 3 paragrafen volgen de paragraaf indeling uit (TAW, 2003) (hoofdstuk 6) en geven specifieke aanvullende informatie over het beheer van drainagesystemen. Daarna volgt een paragraaf over de uitvoering van deze taken. Het hoofdstuk sluit af met de beoordeling.

Het ontwerp van een drainagesysteem (hoofdstuk 5) en het beheer (dit hoofdstuk) zijn direct met elkaar verbonden (TAW, 2003), omdat:

- De Life Cycle Costs (LCC) van een drainagesysteem mede worden bepaald door de kosten van beheer en onderhoud.
- Om te kunnen voldoen aan bepaalde faalkansen, in de ontwerpfase speciale eisen kunnen worden gesteld aan beheer en onderhoud.

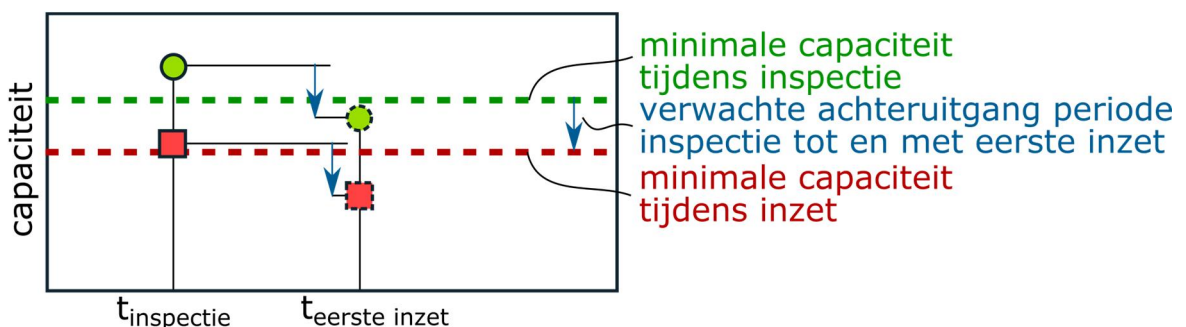
7.2 Inspectie- en onderhoudsplan

Alle informatie betreffende het dagelijks beheer van een kunstwerk is in een beheerplan vastgelegd. Het beheerplan is het instrument voor de voortdurende controle en terugkoppeling naar de gestelde functies (TAW, 2003), paragraaf 6.1. Specifieke aandachtspunten voor een drainagesysteem zijn in deze paragraaf opgenomen.

7.2.1 Onderhoudsstrategie

De onderhoudsstrategie voor een drainagesysteem is toestandsafhankelijk onderhoud, (TAW, 2003), figuur B6.6, omdat de zekerheid over het moment van inzet klein is en de meetbaarheid van de conditie goed is. Dit is toegelicht met een voorbeeld.

Het onderhoud van een drainagesysteem moet gericht zijn op het voldoende zekerheid hebben over het functioneren van het systeem tijdens een periode met hoogwater. De capaciteit van (delen van) het drainagesysteem mag tijdens deze periode van inzet niet beneden de uiterste ontwerpwaarde komen. Tussen het moment van inspectie en de inzet kan de capaciteit afnemen door verstopping. Een dergelijke afname moet worden meegenomen in de inspectie volgens Figuur 7.1. Het systeem met de groene cirkels voldoet, want de capaciteit tijdens de inspectie ligt boven de minimale capaciteit; het systeem met rode vierkanten voldoet niet.



Figuur 7.1 Beoordeling van de capaciteit van een drainagesysteem tijdens een inspectie



Het voorbeeld (Figuur 7.1) heeft een tijdshorizon tot de eerste inzet van het systeem. Na deze inzet moet opnieuw een inspectie worden uitgevoerd. In de onderzoeksstrategie kan gekozen worden om de verwachte achteruitgang gedurende meerdere inzetperiodes te beschouwen; of om de inzetperiodes te specificeren tot een bepaalde afvoer.

De bepaling van de juiste onderhoudsfrequentie is belangrijk. Immers een te lage onderhoudsfrequentie kan tot zodanige verstopping leiden dat het systeem niet voldoet aan de ontwerpcapaciteit. Bovendien zal bij uitgesteld onderhoud het resultaat van de reiniging afnemen, waardoor eerder moet worden overgegaan op noodmaatregelen als reiniging met hoge druk of toepassen van waterstofperoxide. Een te hoge onderhoudsfrequentie is niet wenselijk vanuit kosten oogpunt en vanuit de kans op beschadiging van drains en bodemstructuur door het onderhoud zelf (STOWA, 2000).

De aanbeveling is horizontale drainage na aanleg binnen twee jaar door te spuiten (Kooistra, 2014). Op basis van ervaring van gespecialiseerde aannemers en waterschappen is een onderhoudsfrequentie in de praktijk gangbaar tussen de een en vijf jaar (STOWA, 2000). De onderhoudsfrequentie dient verder in de praktijk bepaald te worden door het meten en registreren van de werking van de drainage en de hoeveelheid uitgespoeld materiaal die bij reiniging vrijkomt.

Informatie over het voorkomen en verwijderen van een putverstopping staat onder anderen vermeld in (Voorkomen en verwijderen van putverstopping door deeltjes op de boorgatwand - Richtlijnen voor ontwerp, realisatie, bedrijfsvoering en regeneratie van pompputten, 2006)

7.2.2 Inspectiestrategie

De keuze van een onderhoudsstrategie leidt tot een bepaald type inspectie. Bij toestandafhankelijk onderhoud horen technische inspecties met als doel: conditie van onderdelen te monitoren en te voorspellen. Bovendien hebben functionele inspecties onder andere als doel om in de perioden tussen technische inspecties eventuele dreigende calamiteiten tijdig te ontdekken (TAW, 2003) (paragraaf B6.4.2.3).

7.3 Bedieningsplan

Een bedieningsplan is relevant voor elk drainagesysteem met regelbare elementen. In het bedieningsplan zijn taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden vastgelegd met betrekking tot de bediening van het kunstwerk (TAW, 2003), paragraaf 6.2. In tegenstelling tot een regelbare kering is voor een drainagesysteem het openen bij hoogwater en sluiten na hoogwater relevant.

7.4 Calamiteitenplan

In het calamiteitenplan dient rekening te worden gehouden met de aanwezigheid van kunstwerken en objecten in de waterkering (TAW, 2003), paragraaf 6.3. Dit betekent dat de locatie van een drainagesysteem bekend moet zijn in een calamiteitenplan.

7.5 Beoordelen

Een drainagesysteem maakt onderdeel uit van de waterkering. Voor de combinatie zijn nog geen concrete beleidsregels beschikbaar. Voor de beoordeling van een drainagesysteem, dat in gebruik is als stabiliteit verbeterende maatregel voor waterkeringen, dient binnen het WBI2017 het spoor 'Toets op Maat' gevolgd te worden (de Groot & Meuwese, 2017).



7.6 Uitvoering beheer taken

Het beheer van een drainagesysteem is de verantwoordelijkheid van het waterschap. Die organisatie heeft veldkennis en moet voldoende kennis en capaciteit hebben om het beheer uit te voeren en te beoordelen. Het (dagelijks) beheer kan onderdeel uitmaken van een opdracht voor een dijkversterking. De opdrachtnemer is dan verantwoordelijk voor aanleg en (een bepaalde) beheerperiode. Ook dan moet het waterschap voldoende kennis hebben om de opdrachtnemer te controleren, na de contractperiode het onderhoud over te nemen, en het systeem in te zetten tijdens hoogwater.

7.6.1 Inspectie methoden

Een drainagesysteem kent toestandsafhankelijk onderhoud en daarom moet de toestand actief worden gemonitord. Dit betreft zowel onder dagelijkse omstandigheden als bij een situatie met hoogwater. Mogelijke inspectiemethoden zijn opgenomen in Tabel 7.1. In het beheersplan is opgenomen aan welke eisen voldaan moet worden.

Inspectiedoel	Inspectie methode	Opmerking
toegankelijkheid systeem	schouw op maaiveld	aanbevolen om jaarlijks uit te voeren, specifiek voor elementen op particulier terrein
afvoerstelsel, lekkage	schouw op maaiveld van verzakkingen	een verzakking kan duiden op zandinspoeling door een lekkage in het afvoerstelsel
afvoerstelsel, lekkage, verzakking en/of verstopping	camera inspectie, inmeting niveaus	verzakking kan door zetting komen, graafwerkzaamheden of door verkeersbelasting tegenschot als gevolg van verschilzettingen kan het functioneren beperken
afvoerlocatie	voorkomen van ijzerafzetting, eventueel overgroeien en de ligging ten opzichte van het slootpeil	
capaciteit winmiddelen	tijdens perioden zonder afvoer: • controle inspectieputten • capaciteitsproef met meting specifiek debiet en / of • camera inspectie tijdens perioden met afvoer: • waarneming debiet, • stijghoogte in omgeving en in winmiddel • natte plekken aan maaiveld altijd: • plaatsing van peilbuis in omstorting • waarneming waterstand in omgeving en in winmiddel	wijze van debiet meting (overlaat, of meter in leiding) moet passend zijn bij lokale omstandigheden om over- of onderschatting van waargenomen debiet te voorkomen
voorkomen wortelschade	aanwezigheid bomen en begroeiing	wortels kunnen systeem beschadigen op locaties waar delen



pov

Piping



dijkinnovatie van binnenuit

Inspectiedoel	Inspectie methode	Opmerking
		van het systeem hoger liggen dan de grondwaterstand
waterkwaliteit	nemen watermonster en analyseren	
Monitoring	uitvoeren van handmeting inspectie monitoringslocaties op zichtbaarheid en schade	naast veldinspectie is continue data validatie van metingen noodzakelijk, en analyse van beschikbare data. De beheersorganisatie moet voorzien in opvolging van meetpunten die uitvallen, of alarmwaarden overschrijden
Afsluiters	visuele inspectie op gebreken	gangbaar houden door periodiek te bedienen
Overloopput	visuele inspectie op gebreken	beweegbare niveau regeling gangbaar houden door periodiek te bedienen
waterberging	visuele inspectie op begroeiing en doorstroombaarheid	is in keur gewaarborgd

Tabel 7.1 Inspectiemiddelen

In de wintermaanden is vaker sprake van hoogwater, waardoor de werking van het drainagesysteem kan worden gemonitord terwijl het drainagesysteem water afvoert (STOWA, 2000). De modeluitkomsten van de hoogwatersituatie dienen dan geëvalueerd te worden en deze uitkomsten moeten dan vergeleken worden met de metingen. Wanneer het hoogwater lager is dan het inschakelpeil, dan moet een regelbaar drainagesysteem hiervoor specifiek worden ingeschakeld. Nadeel is dat onderhoud in de winter niet altijd kan plaatsvinden, omdat de stijghoogte boven maaiveld kan komen te liggen. In dat geval kan een bron of afvoerleiding niet worden geopend. In de zomerperiode kan inspectie ook plaatsvinden, al dan niet door de inzet van pompen (zie Tabel 7.1).

Specifiek voor een grindkoffer kan een kernboring worden uitgevoerd om de fysieke opbouw van de grindkoffer te onderzoeken. Bij een grindkoffer met geotextiel is de maximale boordiepte beperkt tot circa 0,3 m boven het geotextiel om schade aan het geotextiel te voorkomen.

Een laatste inspectiemethode is het opgraven van het drainagesysteem. Dit ligt het meest voor de hand bij het aanwezig zijn van hardnekkige problemen met een horizontale drainage. Een opgraving geeft informatie over de toestand van het systeem, de eventuele omhulling en het bodemprofiel.

7.6.2 Reinigingsmethoden

7.6.2.1 Verticale bronnen en ontlaststelsel

De reiniging kan bestaan uit:

- Bronnen: reinigen van het filter, de stijgbuis en de bronkop (afhankelijk van afname broncapaciteit), (in het project SLa is een frequentie bepaald van circa eenmaal per jaar).
- Leidingsysteem en afvoerleiding: reinigen van het leidingsysteem met een onderhoudsfrequentie van circa eenmaal per jaar.



- Overlooppot: reinigen van de overlooppot met een onderhoudsfrequentie van circa tweemaal per jaar.
- Waterberging: schoonhouden van de watergangen met een frequentie van circa eenmaal per jaar. Deze werkzaamheden worden vanuit de Keur geregeld.

7.6.2.1. Horizontale drainage

Reiniging vindt plaats door middel van het doorspuiten van de drains. Door een slang gekoppeld aan een spuitkop kan vanaf de doorspuitput (met voldoende flauwe bochten) of vanaf de sloot onder hoge druk verstoppingsmateriaal los komen. Via de uitmondingen van de drainage wordt het materiaal uit de drain gestuwd. De afstand van het doorspuiten bedraagt circa 100 à 150 m vanuit een doorspuitput en vanaf een eindbuis circa 200 à 300 m (STOWA, 2000). Belangrijk tijdens de uitvoering van het doorspuiten is dat een te hoge spuitdruk kan zorgen voor schade aan de drains en het omhullingsmateriaal. Bovendien kan omliggende grond 'in beroering' worden gebracht. Een te lage druk kan echter zorgen voor ophoping van materiaal en dus voor verstoppingen (van der Geest Grondwerk, 2017).

7.6.2.1. Grindkoffer

Een grindkoffer zonder drains moet zodanig worden ontworpen dat verstopping niet kan optreden. Wanneer grindkoffers in combinatie met drains worden uitgevoerd kunnen de eerder genoemde onderhoudsmaatregelen worden toegepast.



8 Procedures en besluitvorming

8.1 Uitgangspunten lozen overtollig water

8.1.1 Technische zaken

Lozing van water afkomstig uit een drainagesysteem mag geen overlast veroorzaken bij het waterschap of bij derden. In hoeverre overlast optreedt, wordt beoordeeld in de watertoets. In een watertoets wordt onderzocht wat het effect van een ingreep is op de grondwaterstand, de hoeveelheid kwel en het afvoerdebiet.

Het plaatsen van een drainagesysteem veroorzaakt een verlaging van de grondwaterstand in en rond de dijk. Uiteraard is dit ook het specifieke doel van een drainagesysteem zodat faalmechanismen als macrostabiliteit en piping worden voorkomen. Een term als 'grondwaterneutraal' is daarom niet van toepassing rondom de aanleg van een drainagesysteem. Dit geldt ook voor het maximaliseren van grondwaterstandsveranderingen.

Compenseren van een verandering in het aan- en afvoerdebiet is wel aan de orde. In de analyse dient een lozingslocatie te worden gekozen die de afvoer kan verwerken. Als dat niet het geval is, dient een bestaande watergang te worden aangepast aan de hogere afvoer. Bij lozing onder vrij verval is lozing op het binnendijkse watersysteem de enige optie. Een andere optie is om het water direct terug te pompen met een extra gemaal.

De acceptatie van het effect van de lozing kan afwijken voor de jaarlijkse en de maatgevende situatie.

8.1.2 Praktische zaken

Waterschappen zijn ook beheerder van de kwaliteit van het oppervlaktewater. Het waterschap hanteert als uitgangspunt om verontreiniging van het oppervlaktewater te voorkomen, dan wel te verminderen. Kortom, zoveel mogelijk preventie en indien niet mogelijk dan zuiveren. Het waterschap hanteert bovendien het principe dat de vervuiler betaalt. Voor het lozen van onttrekkingswater op het oppervlaktewater is geen vergunning vereist, indien aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- Het water dat geloosd wordt, is schoon (dus géén saneringswater). Kortom, het betreft in dit geval natuurlijke kwel en/of kwel afkomstig vanuit de rivier die niet vervuild is door een historische bodem- of grondwatervervuiling.
- Ten gevolge van de lozing mag geen visuele verontreiniging van het water optreden.

Bij polders gelegen in westelijk Nederland kan het zoutgehalte een rol spelen bij de keuze of water via de polder kan worden geloosd. Het watersysteem en het landgebruik dienen hierop te worden geanalyseerd.

8.2 Juridische uitgangspunten

Een drainagesysteem zal bij voorkeur worden aangelegd op een locatie die in eigendom is van de waterbeheerder, maar dit zal niet in alle gevallen mogelijk zijn. Het kan voorkomen dat een perceel waarop een drainagesysteem moet worden gerealiseerd, niet in eigendom is, maar waar realisatie essentieel is. Dit hoeft echter geen probleem te zijn. Deze paragraaf bevat informatie hoe in dat geval het drainagesysteem het beste kan worden gerealiseerd. Tevens worden twee juridische vragen besproken. De eerste vraag is hoe juridisch kan



worden geborgd dat het drainagesysteem kan worden onderhouden. De tweede vraag betreft hoe kan worden voorkomen dat de grond waarin het systeem zich bevindt wordt bebouwd.

8.2.1 Zakelijk recht

De gangbare rechtspraktijk is dat, alvorens er een publiekrechtelijk besluit wordt genomen waardoor aantasting van een onroerende zaak rechtens mogelijk wordt, eerst wordt getracht met de grondeigenaren tot een minnelijke overeenstemming te komen.

Aangezien een drainagesysteem in de grond wordt aangelegd, verdient het aanbeveling dat geprobeerd wordt om met de perceeleigenaar tot overeenstemming te komen over een recht van opstal. Dit is een zakelijk recht om in, op of boven een stuk grond in eigendom bij een ander, gebouwen, werken of beplantingen in eigendom te hebben of te verkrijgen (artikel 5:101 van het Burgerlijk Wetboek). Het voordeel van een recht van opstal is dat het waterschap eigenaar blijft van het drainagesysteem. Kortom, hiermee wordt voorkomen dat de grondeigenaar ook eigenaar wordt van het drainagesysteem.

Een recht van opstal wordt gevestigd door middel van een notariële akte en dient in de openbare registers te worden ingeschreven. In de akte van vestiging kunnen de bevoegdheden van het waterschap worden bepaald, bijvoorbeeld de mogelijkheid tot het uitvoeren van onderhoud aan het drainagesysteem.

Het waterschap kan, als eigenaar van het drainagesysteem, het systeem gebruiken, aanbrengen en wegnemen. Aanbevolen wordt om in de akte expliciet op te nemen dat ten behoeve van het gebruik, het drainagesysteem door derden onaangeroerd dient te blijven. Met het opnemen van dit beding in de akte wordt misbruik van het drainagesysteem voorkomen. Dit is bijvoorbeeld het geval als de grondeigenaar grondwater via het drainagesysteem onttrekt voor beregening van zijn tuin.

8.2.2 Onteigening

Wanneer het waterschap en de grondeigenaar niet tot een minnelijke overeenstemming komen, dan kan het waterschap het verzoek doen om het betreffende stuk grond te onteigenen uit algemeen belang.

8.2.3 Gedoogplicht

Indien het te ver voert om het betreffende perceel te onteigenen, dan kan op grond van artikel 5.24 van de Waterwet aan de eigenaar van de grond de plicht worden opgelegd om de aanleg of het wijzigen van een dijk en de daarmee verband houdende werkzaamheden te gedogen. In casu gaat het immers om de aanleg van een drainagesysteem ten behoeve van een dijkversterking. Daarnaast volgt uit artikel 5.23 van de Waterwet dat een grondeigenaar ook gehouden is te gedogen dat onderhouds- en herstelwerkzaamheden worden uitgevoerd aan een drainagesysteem.

Indien ten aanzien van de onteigening dan wel de gedoogplicht niet kan worden voldaan aan de voorwaarden zoals die uit de Onteigeningswet respectievelijk de Waterwet volgen, dan kan worden teruggevallen op de uit de Belemmeringenwet privaatrecht volgende gedoogplicht.

8.2.4 Onderhoud drainagesysteem

Voor het uitvoeren van onderhouds- en herstelwerkzaamheden aan het drainagesysteem, of ter voorkoming van schade aan het drainagesysteem kan het tevens van belang zijn dat op de grond boven het systeem niet wordt gebouwd of aangelegd. Dit kan worden bewerkstelligd



door in de keur een verbodsbepaling op te nemen waarin wordt bepaald dat het verboden is om - binnen een beschermingszone - te bouwen of aan te leggen zonder vergunning. In de legger kan deze beschermingszone worden begrensd.

8.3 Procedures

8.3.1 Projectplan Waterwet / Projectbesluit Omgevingswet

Het drainagesysteem wordt aangelegd, beheerd en onderhouden als onderdeel van een dijkversterking. Voor het wijzigen van een waterstaatswerk dient een projectplan Waterwet te worden opgesteld. Dit wijzigt in de toekomst in een projectbesluit conform de Omgevingswet. In dit projectbesluit dient het werk te worden omschreven en dienen de gevolgen voor de omgeving, de mitigerende en compenserende maatregelen, de te doorlopen procedures, het beheer en onderhoud en de wijze van inspraak te worden aangegeven. De procedure van ter inzage legging wordt samen met de benodigde vergunningen gecoördineerd door de provincie.

8.3.2 Omgevingsvergunning strijdigheid bestemmingsplan

Afhankelijk van de inhoud van het bestemmingsplan kan een wijziging van het bestemmingsplan noodzakelijk zijn.

8.3.3 Aanmeldingsnotitie voor de MER-beoordeling

Bij een dijkversterking dient te worden beoordeeld of een MER noodzakelijk is. Dit begint met het opstellen van een aanmeldingsnotitie voor de MER beoordeling. In een dergelijke notitie worden de effecten van de dijkversterking bepaald op onderwerpen zoals landschap, archeologie, milieu, flora en fauna. Indien sprake is van negatieve effecten dient te worden aangegeven welke mitigerende of compenserende maatregelen worden getroffen.

8.3.4 Omgevingsvergunningen die niet van toepassing zijn

Een omgevingsvergunning voor het uitvoeren van een werk, geen bouwwerk zijnde, of van werkzaamheden is niet noodzakelijk aangezien de aanleg valt onder de gecoördineerde procedure. Tevens is een omgevingsvergunning voor bouwen niet noodzakelijk omdat het drainagesysteem hiervan vrijgesteld is. Dit geldt alleen indien het drainagesysteem ten behoeve is van een infrastructurele of openbare voorziening, voor zover het ondergrondse buis- en leidingstelsels betreft die geen gevaarlijke stoffen vervoeren.

8.3.5 Omgevingsvergunning kappen

Afhankelijk van de gemeente kan een kapvergunning noodzakelijk zijn voor bomen die 'in het werk' staan en verwijderd moeten worden.

8.3.6 Ontheffing Provinciale Milieuverordening

Als het drainagesysteem wordt geplaatst in een gebied dat is aangewezen voor drinkwaterwinning, dan is daarvoor een ontheffing nodig van de Provinciale Milieuverordening. Deze ontheffing geldt voor zowel het waterwingebied zelf, het grondwaterbeschermingsgebied en de daaromheen gedefinieerde boringvrije zone.

8.4 Uitvoering

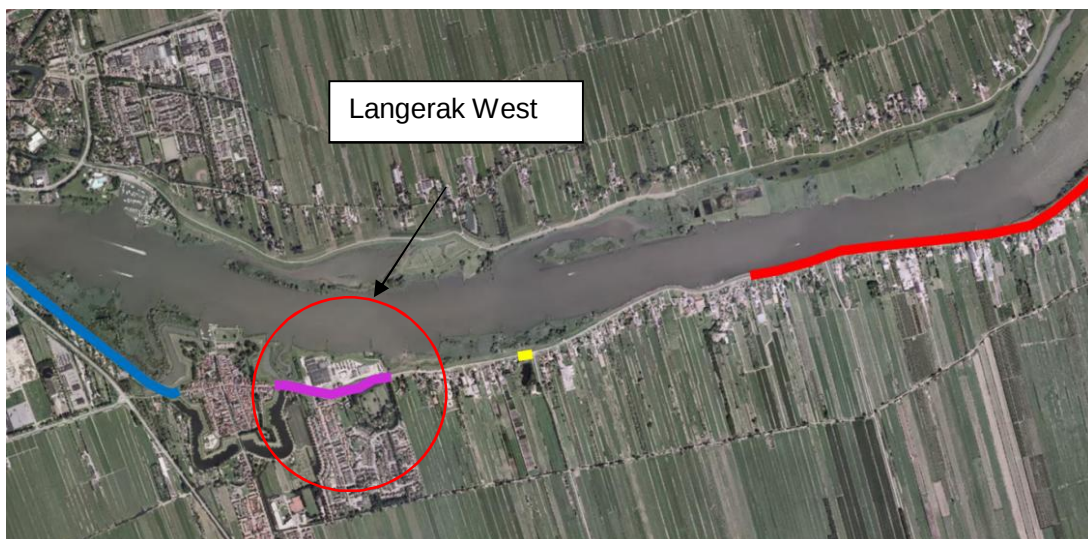
Voorafgaand aan het werk dient een VGM-plan (Veiligheid, Gezondheid en Milieu) te worden opgesteld waarin de aspecten worden beschreven ten aanzien van veilig werken en werken volgens gangbare milieunormen.

9 Rekenvoorbeelden

9.1 Rivierdijk I Schoonhovenseveer–Langerak (SLa) - waterontspanner

9.1.1 Inleiding

De dijkverbetering in het project Schoonhovenseveer-Langerak (SLa) is uitgevoerd voor het verbeteren van de macrostabiliteit aan de binnenzijde van de waterkering (STBI). De toepassing van verticale putten (de waterontspanners) verlagen de waterdruk in de tussenzandlaag (TZ) onder het binnentalud van de waterkering waardoor de stabiliteit is verbeterd. Het drainagesysteem bestaat uit PVC stijgbuizen die zijn voorzien van perforaties aan de onderzijde. Een verzamelleiding parallel aan de waterkering voert het water af en loost deze in sloten van het achterland. Het systeem werkt geheel onder vrij verval. In onderstaande figuur zijn de te verbeteren dijkvakken weergegeven. Dit voorbeeld gaat uit van het dijkvak Langerak West.



Figuur 9.1 Indeling van dijkvakken

Het dijkvak Langerak West begint vanaf de oostzijde van de stadsgracht (Dp 254-060) van Nieuwpoort en loopt tot de Slotlaan (Dp 256+055) in Langerak. Tussen AW. 255+100 en 256+000 bevindt zich aan de teen van de dijk een archeologische watergang. Aan de buitenzijde van de dijk is een relatief groot voorland aanwezig waarop bedrijven zijn gevestigd. In dit rekenvoorbeeld voor het dijkvak Langerak-West is een ontwerp opgesteld en zijn berekeningen uitgevoerd. Vervolgens is het ontwerp op basis van metingen geëvalueerd. Gekeken is of de uitgangspunten met betrekking tot stabiliteit van de waterkering in lijn zijn met de 'as built' situatie.

9.1.2 Algemene aanpak

De interactie tussen de geotechnisch adviseur en de geohydroloog dient gedurende het gehele ontwerpproces (VO t/m UO fase) plaats te vinden. De dimensionering van het drainagesysteem is volgens de volgende onderzoekstappen verlopen:

1. Uitwisseling informatie, uitgangspunten, definiëren grondonderzoek.
2. Analyse van het grondwatersysteem. Daarbij worden alle beschikbare gegevens geraadpleegd: boringen, sonderingen, peilbuizen, REGISII, MORIA-SLa model,



- topografie, etc. Deze gegevens kunnen worden georganiseerd in een GIS (QGIS) en klaargemaakt om in te voeren in numerieke modellen.
3. Vertaling van het grondwatersysteem naar een numeriek grondwatermodel. Daarbij kan de eindige-verschillen rekencode ModFlow worden toegepast.
 4. Tijdsafhankelijke kalibratie van de grondwatermodellen aan de hand van tijdreeksen van grondwaterpeilen in functie van het rivierpeil, voor peilbuizen vlakbij de waterkering. Simulaties van verschillende scenario's (variëren van de parameters).
 5. D-GeoStability analyse:
 - Nulsituatie.
 - Situatie met verlaging stijghoogte waarbij de dijkveiligheid is gewaarborgd.
 6. Ontwerpkeuzes en definitieve D-GeoStability analyses.
 7. Uitvoeren en interpretatie aanvullende onderzoeken, aanpassen berekeningen, verificatie locaties van de verticale putten, dieptes, etc.
 8. Het uitvoeren van een risicoanalyse. De robuustheid van het systeem wordt nagegaan door de gevoeligheid vast te stellen voor de modelparameters en de betrouwbaarheid van de werking van het drainagesysteem.
 9. Definitieve verlaginglijnen als gevolg van het drainagesysteem in de uitgevoerde D-GeoStability analyses.
 10. Controle configuratie / inpasbaarheid / uitvoerbaarheid van de onderdelen van het drainagesysteem.
 11. Validatie en verificatie.

9.1.3 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Voor het project SLa zijn ten behoeve van de geotechnische en geohydrologische analyses naast de technische nota de volgende randvoorwaarden en uitgangspunten gehanteerd:

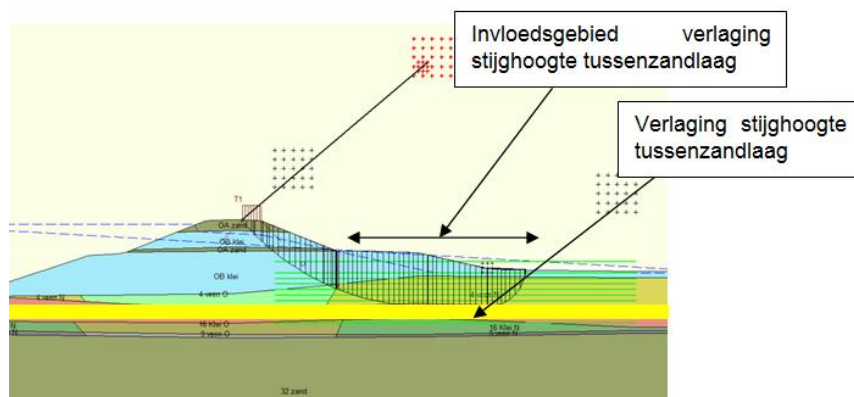
1. Hoogte waterkeringen:
Bij de hoogtetoetsing is rekening gehouden met zetting/bodemdaling. Dit houdt voor de toetsing van de stabiliteit in dat een autonome bodemdaling gehandhaafd wordt zonder compensatie ten behoeve van de kruinhoogte.
2. Geometrie:
Uitgegaan is van een veilige schematisatie conform LOR 2. Dat betekent dat in elk subdijkvak uitgegaan is van het maatgevende dwarsprofiel en een achterliggend maaiveld (met nagemeten hoogtes). Er is rekening gehouden met bodemdaling voor een periode van 50 jaar.
In onderstaande figuur zijn op basis van de AHN2 de laagst mogelijke maaiveldhoogtes (licht groen) direct achter de dijk bepaald. Aan de hand van ingemeten dwarsprofielen zijn de hoogtegegevens van AHN2 geverifieerd. Bij de schematisering zijn de maaiveldhoogtes uit de metingen en de AHN2 profielen in de berekende dwarsprofielen opgenomen.



Figuur 9.2 Hoogteligging maaiveld Langerak West en foto-impressie nabij DP. 254+050



3. **Stabiliteit waterkering (STBI):**
De stijghoogte kan dusdanig hoog worden dat het gewicht van het achterland niet groot genoeg meer is om deze waterspanning te kunnen weerstaan en opgedrukt wordt of open barst. Dit is het verschijnsel “opdrijven” en “opbarsten”. In het project SLa spreken we van opdrijven indien de afdekkende grondlaag een dikte $D \geq 4$ m heeft. Is D kleiner dan 4 m dan spreken we van opbarsten. Bij opbarsten dienen de sterkteparameters van de grond c' en φ' gereduceerd te worden tot nul. De stijghoogte in de zandlaag kan voor beide situaties niet hoger worden dan het gewicht van de afdekkende grondlagen (bepaald met gemiddelde grondparameters en materiaalfactor 1,0). Dit is de zogenaamde “grenspotentiaal”. De stabiliteit is berekend met cirkelvormige glijvlakken methode Bishop en met niet-cirkelvormige glijvlakken methode UpLift Van. Op basis van de theoretische stijghoogte (σ_w) in het achterland en de grondspanningslijn (σ_g) is de locatie (het dichtstbijzijnde punt van de dijk) van het opdrijfpunt bepaald. Voor het huidige project SLa geldt dat bij maatgevend hoogwater (MHW) de stabiliteitsfactor $STBI \geq 1,17$ moet zijn voor zowel een oplossing met als zonder drainagesysteem voor cirkelvormige glijvlakken en $1,05 \times 1,17 = 1,23$ voor niet-cirkelvormige glijvlakken.
4. **Bovenbelasting:**
Bovenbelasting op de dijk bedraagt 13 kN/m^2 over een breedte van 2,5 m. Hierbij geldt geen spreiding van de bovenbelasting en 100% wateroverspanning in de onderliggende klei- en veenlagen. Er is geen verkeersbelasting op de parallelweg op de steunberm aangehouden omdat dit een gunstig effect heeft op de stabiliteit.
5. **Waterstanden en stijghoogten:**
De ontwerpwaterstand is aangehouden voor een planperiode van 50 jaar. De bepaling van de stijghoogten en het verloop van de waterspanningen in de cohesieve lagen, in de watervoerende tussenzandlaag (TZ) en in de Pleistocene zandlaag (PZ) tijdens MHW zijn door de geohydrologen bepaald. Het MORIA model is hierbij gebruikt als randvoorwaarde. Uitgangspunt is dat er geen bronnen in de Pleistocene zandlaag worden aangebracht.
6. **Geotechnisch faalmechanisme:**
Het principe is, dat de stabiliteit van de waterkering wordt verhoogd door het verlagen van de stijghoogte in de tussenzandlagen. De korrelspanningen en daardoor schuifspanningen nemen hierdoor toe waardoor de dijk sterker wordt. Het geotechnisch faalmechanisme is weergegeven in Figuur 9.3.



Figuur 9.3 Principe van het faalmechanisme

7. **Parameters:**
Voor de stabiliteitsberekeningen van het huidige ontwerp SLa is gebruik gemaakt van de spanningsafhankelijke sterkteparameters ($\sigma - \tau$). Deze set parameters, welke gebaseerd is op celproeven, is door Waterschap Rivierenland (WSRL) opgesteld



(WSRL, 2014). Onder en naast de dijk zijn aparte sterkteparameters voor de ondergrond aangehouden. Onder de dijk gelden hogere waarden voor c' en ϕ' dan ernaast. De volumegewichten van de te onderscheiden grondlagen zijn uit de boringen gehaald, welke rondom het beschouwde dwarsprofiel zijn gemaakt. SLa

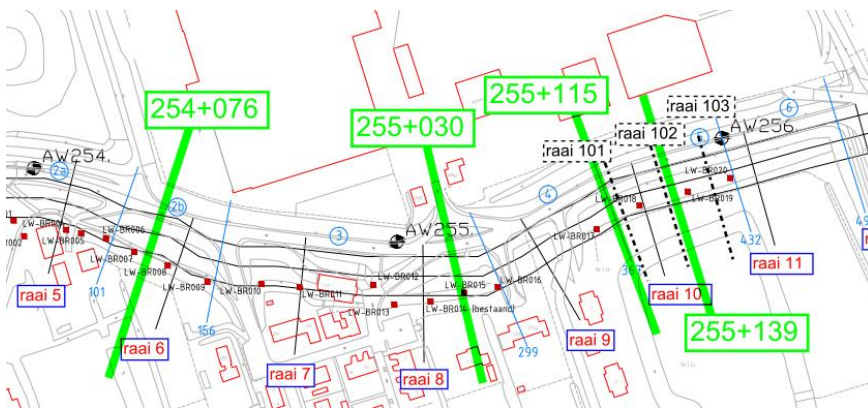
De Parameters die van invloed zijn op de haalbaarheid van de toepassing van de waterontspanners, staan onderstaand vermeld en weergegeven in de verdere uitwerking:

- Toelaatbare stijghoogte in het holocene zandpakket bij een MHW golf t.o.v. het waterniveau in de polder.
- Hydraulische weerstand tussen de rivier en het holocene zandpakket.
- Hydraulische weerstand tussen de rivier en het pleistocene zandpakket.
- Doorlatendheid van het holocene- en pleistocene zandpakket.
- Laagdikte holocene zandpakket.
- Weerstand klei- en veenpakket.
- Bergingscoëfficiënten.
- Kwaliteit van de waterontspanners.
- Maaiveldligging, geometrie, bodemopbouw, waterspanningen en freatische lijn.

Daarnaast hebben een verificatie van de kritische parameters en een validatie plaatsgevonden. Bovendien zijn de monitoring van de kwaliteit van de waterontspanners en het onderhoud nader beschouwd.

9.1.4 Beschrijving – grondopbouw en geohydrologie

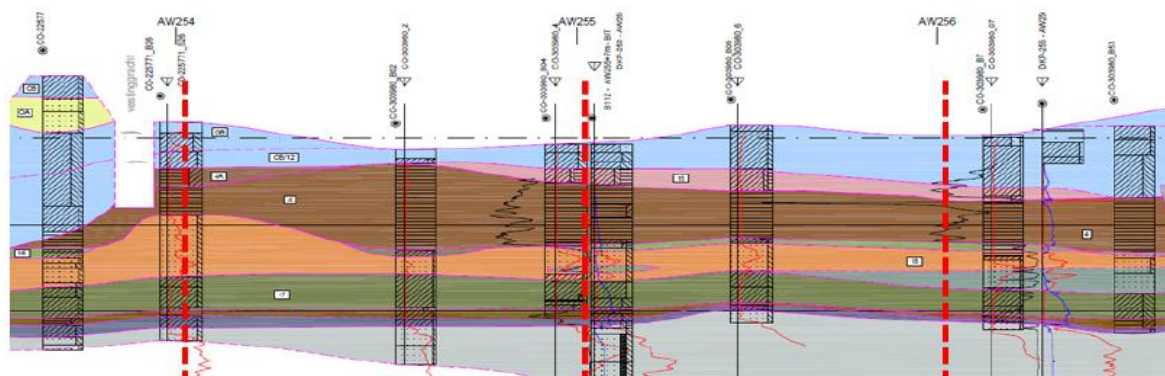
Een situatietekening is weergegeven in Figuur 9.4. Op de tekening staan vakindelingen en raaien aangegeven. Twee dwarsprofielen, 254+076 (vak 2b) en 255+139 (vak 5), zijn nader beschouwd.



Figuur 9.4 Overzicht vakindelingen (blauw omcirkelde getallen), positie raaien (zwarte lijnen) en maatgevende dwarsprofielen (groene lijnen) De rode puntjes stellen de bronnen voor

Bodemopbouw

De bodemopbouw ter plaatse van de kruin van de dijk is weergegeven in Tabel 9.1. Hierbij is uitgegaan van het geotechnisch lengteprofiel en het aanvullend uitgevoerde grondonderzoek. In onderstaande figuur is de bodemopbouw geschematiseerd in een geotechnisch lengteprofiel.



Figuur 9.5 Laagopbouw dijkvak Langerak-West

De bodemopbouw ter plaatse van het maaiveld ter plaatse van de kruin staat weergegeven in Tabel 9.1. Op een niveau van circa NAP-4 tot -8 m bevindt zich een tussenzandlaag (TZ laag) waarin de waterontspanners zijn geplaatst. Dit is de oranjegekleurde laag in het profiel. Het Pleistocene zand (grijze kleur) komt voor vanaf NAP-10 m. Tussen deze twee zandlagen en boven de TZ laag bevinden zich veen-, klei- en klei, zandige lagen.

Diepte [circa m+NAP]		Grondsoort		Opmerkingen
Van	Tot			
+5,30	+5,00	OA	Hoofdzakelijk zand	
+5,00	-1,00	OB	Hoofdzakelijk klei	
-1,00	-2,50	12	Klei	
-2,50	-4,70	15	Klei (Komklei)	
-4,70	-6,50	4	Veen	
-6,50	-7,80	18	Zand	Tussenzandlaag
-7,80	-9,70	17	Klei, zandig	
-9,70	-10,20	9	Veen	
-10,20	-10,50	31	Klei, vaak zandig	
-10,50	e.v.	32	Zand	Pleistocene zandlaag

Tabel 9.1 Bodemopbouw ter plaatse van de kruin

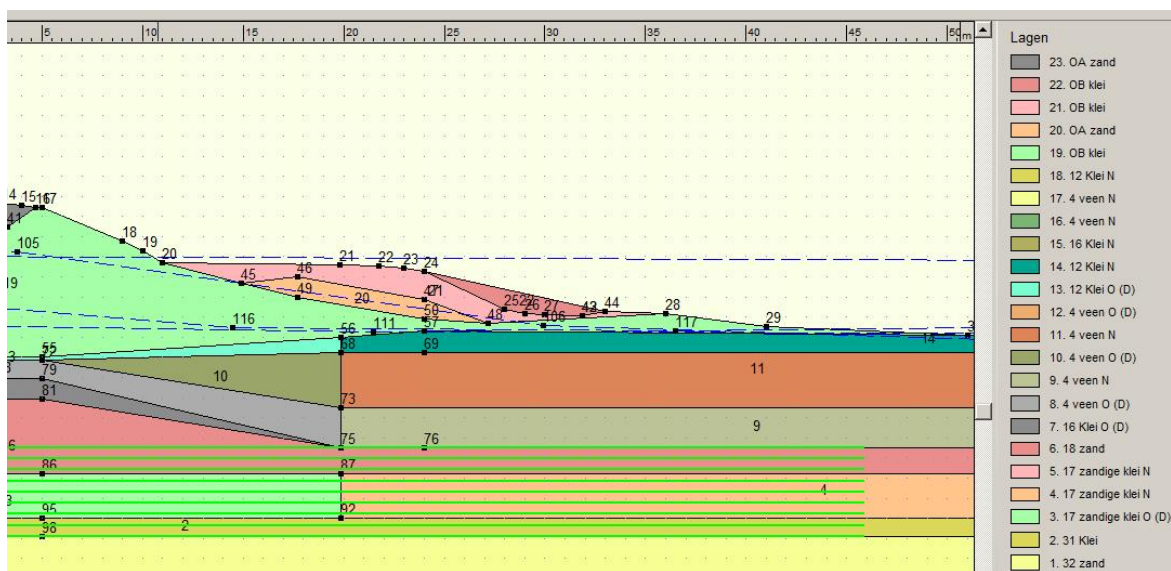
De bodemopbouw ter plaatse van het maaiveld direct achter de steunberm staat weergegeven in Tabel 9.2. Hierbij is uitgegaan van het geotechnisch lengteprofiel en het aanvullend uitgevoerde grondonderzoek.

Diepte [circa m t.o.v. NAP]		Grondsoort		Opmerkingen
Van	Tot			
+0,20	-2,00	OB	Hoofdzakelijk klei	
-2,00	-3,00	15	Klei (Komklei)	
-3,00	-6,10	4	Veen	
-6,10	-7,60	18	Zand	Tussenzandlaag
-7,60	-9,00	17	Klei, zandig	
-9,00	-9,20	9	Veen	
-9,20	-9,40	31	Klei, vaak zandig	
-9,40	e.v.	32	Zand	Pleistocene zandlaag



Tabel 9.2 Bodemopbouw vanaf het maaiveld direct achter de steunberm

De bodemopbouw tussen kruin en het achterland verloopt en hiervoor wordt verwezen naar de bodemopbouw van de D-GeoStability analyse. De D-GeoStability analyse gaat uit van een gezette bodemopbouw. De laagopbouw van de ondergrond in globale zin is opgenomen in Figuur 9.6.



Figuur 9.6 Schematisatie dwarsprofiel Langerak West DP. 254+076 Grondparameters

Voor de sterkteparameters (τ - σ) wordt verwezen naar de technische nota (WSRL, 2014) en voor de volumegewichten wordt verwezen naar de D-GeoStability analyses (De Vries & van de Wiel, 2015). De modelparameters voor het deelmodel Langerak-West zijn weergegeven in Tabel 9.4. De weerstand van de waterbodem van de Lek is gezet op 20 dagen voor het Pleistoceen en 0,1 dag voor de Holocene lagen.

In onderstaande tabel zijn zowel de POP waarden als de S_d waarden opgenomen welke in de berekeningen zijn gehanteerd. S_d waarden zijn gegeven voor de cohesieve lagen. Voor de cohesieloze lagen (zand) zijn de gedraineerde parameters c_d en ϕ_d gegeven.

Grondlaag	Oude naam formatie	Nieuwe naam formatie	γ [kN/m ³]	POP [kN/m ²]	S_d [-]	c'_d [kN/m ²]	ϕ'_d [°]
OA zand	Anthropogeen	Anthropogeen	17,0/19,0	-	-	0	33,0
OB klei	Anthropogeen	Anthropogeen	18,5	7	0,31	-	-
12 klei naast	Tiel	Echteld	15,4	10	0,25	-	-
12 klei onder	Tiel	Echteld	17,0	12,5	0,22	-	-
4 veen naast	Hollandveen	Nieuwkoop	10,8	1	0,42	-	-
4 veen onder	Hollandveen	Nieuwkoop	12,8	5	0,35	-	-
16 klei naast	Gorkum	Echteld	16,0	12,5	0,22	-	-
16 klei onder	Gorkum	Echteld	17,5	12,5	0,22	-	-
17 zandige klei naast	Gorkum	Echteld	16,0	15	0,30	-	-
17 zandige klei onder	Gorkum	Echteld	17,5	15	0,30	-	-
31 klei	Kreftenheye	Kreftenheye	18,3	10	0,30	-	-
32 zand	Kreftenheye	Kreftenheye	20,0	-	-	0	30,0

De POP en S_d waarden onder de dijk (Langhorst, 2017)



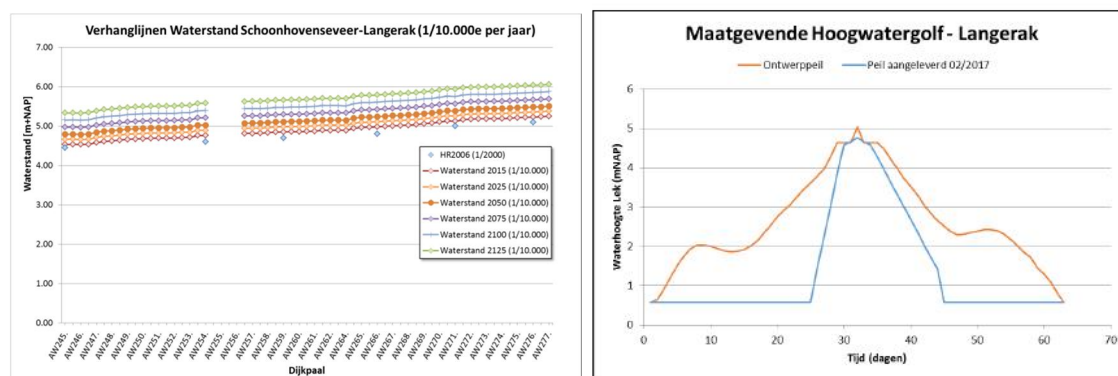
Tabel 9.3 Geotechnische modelparameters deelmodel Langerak

Grondlaag	K_h	K_v	S_s	S_y
	m/d	m/d	1/m	m/m
dijk	0,001	0,001	0,001	0,05
hlc (Holoceen)	0,0085	0,0085	0,01	0,05
tussenzandlaag (Echteld)	15	5	0,00001	0,20
Basisveen + klei (Wijchen)	0,01	0,01	0,002	0,05
krz2_6 (Kreftenheye zand)	25	10	0,00001	0,20

Tabel 9.4 Geohydrologische modelparameters deelmodel Langerak

Geohydrologie

De te verwachten stijghoogten in de zandlagen, als gevolg van MHW, zijn met een geohydrologisch 3D-model bepaald. Het conceptuele model is vertaald naar een numeriek grondwatermodel om het conceptuele model te toetsen. Hierbij is gebruik gemaakt van het eindige-verschillen rekenprogramma 'MODFLOW', met 'Groundwater Vistas' als interface. De hydraulische ontwerprandvoorwaarden (ontwerpwaterstanden en hydraulische belastingniveau's) zijn bepaald voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100. Uitgegaan is van een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar. De berekende hoogste waterstanden voor het project SLa staan gegeven in de linker figuur van Figuur 9.7. De situatie voor zichtjaar 2025, 2075 en 2125 is afgeleid uit de genoemde berekende zichtjaren.



Figuur 9.7 Ontwerpwaterstanden op de Lek (links) en Verschil ontwerpwaterstand huidig ontwerp voor een planperiode van 50 jaar (2065) (HKV, 2017)

Voor het conceptuele model van de ondergrond zijn verschillende bronnen gebruikt om inzicht te krijgen in het gebied. Om een eerste indruk te krijgen hoe de ondergrond in elkaar zit is REGIS II en GEOTOP, op het onderdeel Hydro-geologische lagenmodellen, geraadpleegd. Uit de beschikbare informatie zijn de kaders van de hydraulische parameters afgeleid. Kalibratie geeft een verdere aanscherping van de hydraulische parameters.

Oppervlaktewater

De locatie van de rivier is bepaald op basis van kaarten. De waterstanden van de rivier komen voort uit openbare databanken, zoals PDOK⁸ en waterbase.nl. Dit gaat echter over historische waterstanden. De rivier staat, door erosie van de bodem, op sommige locaties in

⁸ PDOK: Publieke Dienstverlening Op de Kaart



direct contact met zandlagen. Deze lage weerstand is in het model gebracht door een lage weerstand van de rivierbodem.



Model pakketten

Voor het model is MODFLOW2000 gebruikt. Buiten de basispakketten, zoals het opbouwen van het rekenrooster (grid) en het toekennen van doorlatendheden en weerstanden, zijn de WEL (well package), DRN (drain package) en GHB (general head boundary) modules gebruikt.

Pompproeven

Langs de rivier zijn verschillende pompproeven in de tussenzandlaag uitgevoerd om op een relatief simpele manier geohydrologische parameters te bepalen. De verwerking van deze verlaging en de vertaling naar hydro-geologische parameters is gedaan met het programma MLU (Multi-Layer Unsteady state).

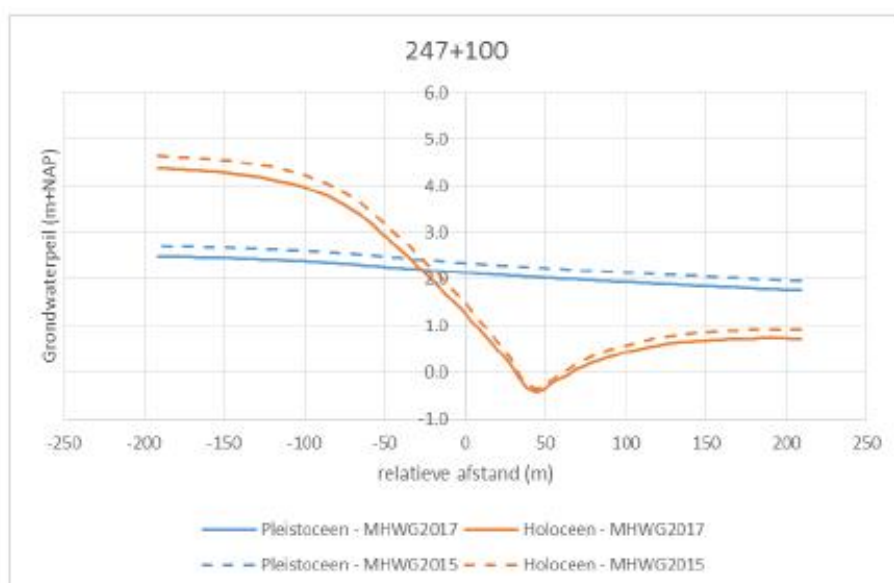
Stijghoogte en stijghoogteverloop

Het verloop van de stijghoogte in de verschillende grondpakketten is geschematiseerd in D-GeoStability.

Grondsoort	PN lijn [-]
Deklaag	1
Overgang (2 m tot tussenzand)	2
Tussenzandlaag	3
Overgang (tussenzand tot Pleistoceen)	3 naar 4
Pleistocene zandlaag	4

Tabel 9.5 Stijghoogteverloop in de verschillende grondlagen

De freatische lijn, de stijghoogten in de zandlagen evenals de PN lijnen zijn bepaald en zijn geschematiseerd. In onderstaande figuur zijn de stijghoogtes als gevolg van het MHW weergegeven in de TZ-laag en de PZ-laag ter hoogte van de Veersedijk 247+100 met een bron op 45 m.



Figuur 9.8 Stijghoogtes in TZ- en PZ laag a.g.v. MHW – Veersedijk 247+100. Bron op een afstand van circa 45 m

De waarden, die ingevoerd zijn in de berekeningen, zijn weergegeven in Tabel 9.6 en Tabel 9.7.

Dijkvak	Stijghoogte BUK [m NAP]	Stijghoogte AL [m NAP]
Langerak West	-0,75	-0,85

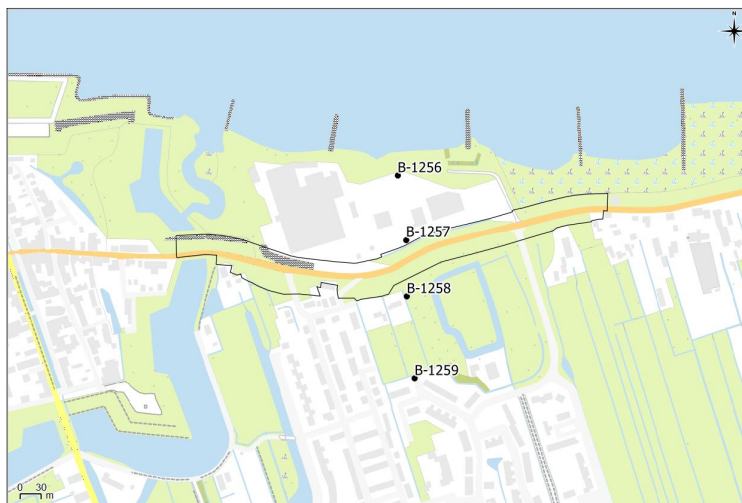
Tabel 9.6 Stijghoogte onder dagelijkse omstandigheden

Dijkvak	[DP]	BUK [m NAP]	BIK [m NAP]	BR [m NAP]	AL [m NAP]	GP [m NAP]	Opdrijven
Langerak W TZ	254+076	+1,00	+0,30	-0,70	-0,30	-0,20	Nee
Langerak W PZ	254+076	+3,05	-	-	+2,80	+3,10	Nee

Tabel 9.7 Stijghoogten in enkel punten in TZ- en PZ laag a.g.v. MHW

- BUK = buitenkruinlijn.
 BIK = binnenkruinlijn.
 BR = bron.
 AL = achterland (op circa 60 m uit BUK).
 GP = grenspotential t.p.v. "laagste" punt maaiveld.

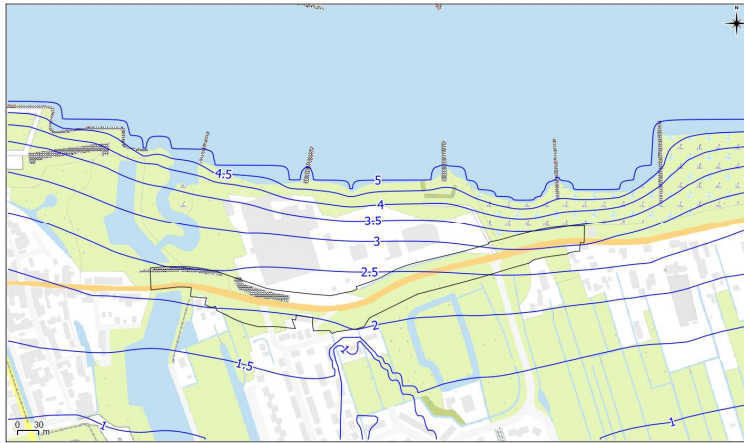
Voor het deelmodel Langerak-West is een raai beschikbaar bestaande uit vier peilbuizen (Figuur 9.9). De vergelijking is uitgevoerd voor elke peilbuis tussen gemeten en gemodelleerde stijghoogten. De peilbuizen zijn gebruikt voor een tijdsafhankelijke kalibratie, waarbij de hydraulische parameters zijn gekalibreerd.



Figuur 9.9 Locatie peilbuizen Langerak-West

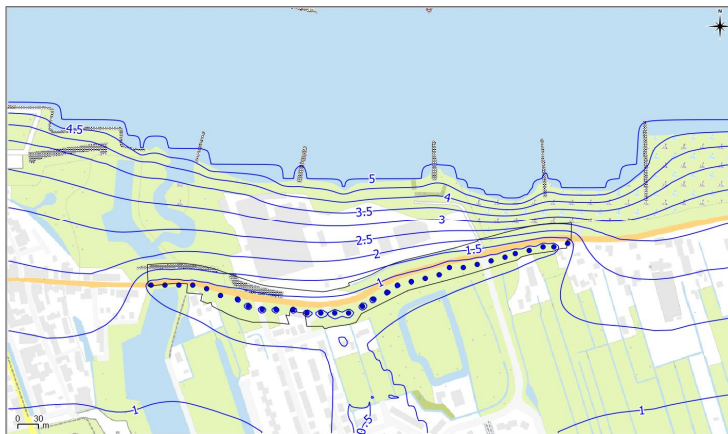
9.1.5 Uitwerking

De gesimuleerde stijghoogten van de holocene zandlaag zonder toepassing van het drainagesysteem staan weergegeven in Figuur 9.10.



Figuur 9.10 Gesimuleerde stijghoogte (m+NAP) in de Holocene zandlaag

De onttrekkingsputten van het drainagesysteem zijn enkel in de holocene zandlaag geplaatst. In principe is dat voldoende omdat voor deze situatie de hydraulische weerstand tussen de holocene zandlaag en de pleistocene zandlaag voldoende groot is. De gesimuleerde stijghoogten van de zandlagen met toepassing van waterontspanners zijn weergegeven in Figuur 9.11.



Figuur 9.11 Gesimuleerde stijghoogte (m+NAP) in de Holocene zandlaag. De winputten zijn de blauwe punten

Een vergelijking is gemaakt tussen de waterspanningen die gehanteerd zijn in het ontwerp en voor de uitgangspunten onder as built. De resultaten staan vermeld in

Profiel	Maat-gevende raai	Stijghoogte TZ buitenkruin met bronnen [m t.o.v. NAP]	Stijghoogte TZ t.p.v. bron [m t.o.v. NAP]	Locatie bron [X ⁹ in m]	Stijghoogte PZ kruin met bronnen [m t.o.v. NAP]	Stijghoogte PZ achterland met bronnen [m t.o.v. NAP]
254+076 (vak 2b)	5	+1,20	-0,75	33	+3,25	+3,00
	5 aangepast	+1,20	-0,60	33	+3,25	+3,00

Tabel 9.8 Vergelijk stijghoogten ontwerp en as built

Voor het afvoerdebiet naar de polder geldt een hoogwatergolf van 1/10 jaar als maatgevend.

⁹ Dit is de x-coördinaat in de schematisering met D-GeoStability.



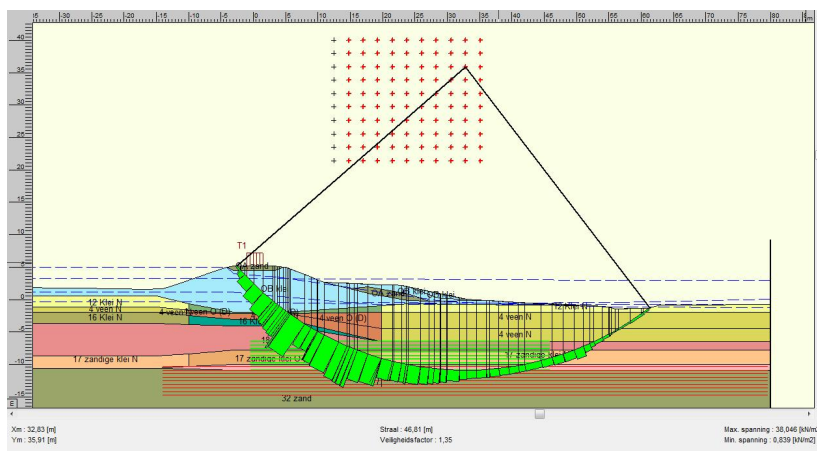
D-GeoStability berekeningen

De glijvlakken zijn berekend met de methode Bishop, voor de drukstaafmethode is 'Uplift Van' gebruikt. Naar aanleiding van de evaluatieresultaten zijn twee berekeningen beschouwd. De waarden zijn weergegeven in Tabel 9.9.

Profiel	Maatgevende raai	Afstelniveau bron [m t.o.v. NAP]	SF Bishop [-]	SF Uplift Van [-]	Opmerking
254+076 (vak 2b)	5	-1,25	1,36	Berm = 1,17 Dijk > 1,17	Oorspronkelijk ontwerp uitgangspunten
	5 aangepast ¹⁰	-1,25	1,35	Berm = 1,17 Dijk > 1,17	Berekening met optimalisatie door interpolatie tot waarden grens dijkvak

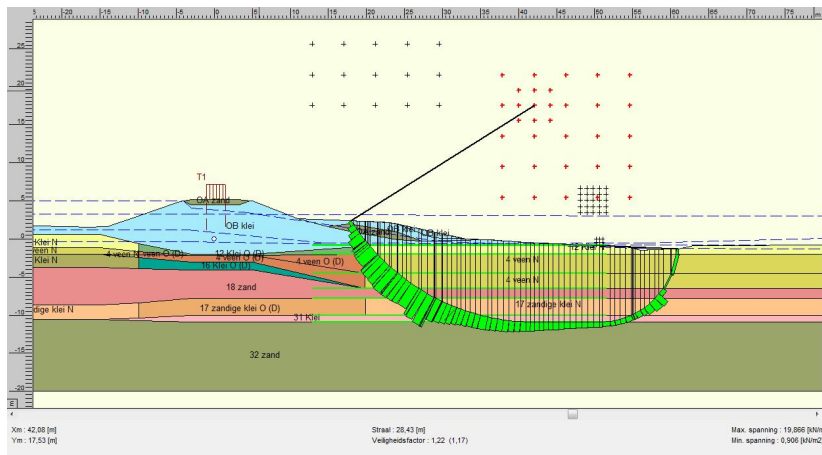
Tabel 9.9 Overzicht stabiliteit bij evaluatiewaarden waterspanningen

De resultaten van de berekeningen van profiel 254-076 (vak 2b) staan weergegeven in Tabel 9.9, in Figuur 9.12 en in Figuur 9.13.



Figuur 9.12 Berekening uitgevoerd met Bishop, SF = 1,35

¹⁰ De waarden van deze raai zijn op basis van interpolatie tussen raai 4 en 5



Figuur 9.13 Berekening uitgevoerd met Uplift Van, SF Berm = 1,17 / Dijk > 1,17

Consequentieanalyse

In het OI2014v4 en WBI2017 wordt uitgegaan van het rekenen met overstromingskansnormen. Om enig inzicht te verkrijgen in de verschillen tussen de uitgevoerde berekeningen van het huidige ontwerp en WBI2017 is een consequentieanalyse uitgevoerd met het Ontwerpinstrumentarium 2014v4. Hoewel in het WBI2017 enkel het Critical State Soil Model (CSSM) gebruikt zal worden is in dit geval ook naar het Mohr-Coulomb model (MC) gekeken. Daarbij is verder gebruik gemaakt van vigerende leidraden en technische richtlijnen. De berekening is semi-probabilistisch uitgevoerd. Uitgegaan wordt van een overstromingskansnorm welke vertaald wordt naar faalkanseisen per bezwijkmechanisme. Het lengte-effect van het dijktraject wordt daarbij in rekening gebracht. Per bezwijkmechanisme kan de betrouwbaarheidsindex worden berekend, die kan worden omgezet in een schadefactor waarmee op doorsnedeniveau kan worden getoetst. Voor het ontwerp van het project SLa is de veiligheidsfilosofie van het WBI2017 aangegeven met een maximaal toelaatbare kans (ondergrens) $P_{\max} = 1/10.000^e$ per jaar en een dijkkringlengte $L = 19,9$ km. De minimaal benodigde veiligheids- of stabiliteitsfactor is bepaald waaraan dient te worden getoetst.

Bepaling partiële factoren γ

Stap 1 Bepaling faalkanseis

$$P_{\text{eis}} = 2,83 \cdot 10^{-7} \text{ [1/jaar]}$$

Stap 2 Bepaling van de schadefactor γ_n

Voor MC model: $\gamma_n = 1 + 0,13 \cdot (\beta_{\text{eis;drsn}} - 4,0)$ en voor CSSM model: $\gamma_n = 0,41 + 0,15 \cdot \beta_{\text{eis;drsn}}$. ϕ^{-1} is de inverse van de standaardnormale verdeling. Dit betekent bij een faalkanseis van $P_{\text{eis}} = 2,83 \cdot 10^{-7}$ een betrouwbaarheidsindex van $\beta_{\text{eis;drsn}} = 5,00$.

Dit geeft een schadefactor γ_n van voor MC model: $\gamma_n = 1 + 0,13 \cdot (5,00 - 4,0) = 1,13$ en voor CSSM model: $\gamma_n = 0,41 + 0,15 \cdot 5,00 = 1,16$.

Stap 3 Bepaling van de schematiseringsfactor γ_b

De schematiseringsfactor $\gamma_b = 1,11$ voor zowel het rekenmodel MC als CSSM.

Stap 4 Bepaling van de modelfactor γ_d

De modelfactoren voor het MC model zijn voor Bishop: $\gamma_d = 1,00$ bij geen opdrijven en $\gamma_d = 1,10$ bij opdrijven, voor UpLift Van: $\gamma_d = 0,95$ bij geen opdrijven en $\gamma_d = 1,05$ bij opdrijven. De modelfactoren voor het CSSM model zijn voor Bishop: $\gamma_d = 1,11$, UpLift Van: $\gamma_d = 1,06$ en



Spencer: $\gamma_d = 1,07$. Voor CSSM berekeningen wordt volgens het WBI2017 geen onderscheid gemaakt tussen opdrijven en niet opdrijven.

Stap 5 Bepaling van de materiaalfactor γ_m

$\gamma_m = 1,0$.

Bepaling veiligheidsfactor γ_R

De veiligheidsfactor γ_R waaraan de berekende stabiliteitsfactor dient te worden getoetst is afhankelijk van het gebruikte rekenmodel (Bishop of UpLift Van), of er gedraineerd of ongedraineerd gerekend wordt en of het achterland wel of niet opdrijft. In onderstaande tabel zijn de verschillende veiligheidsfactoren gegeven waaraan getoetst dient te worden.

Model	MC of CSSM ¹¹	Wel / geen opdrijven	γ_n [-]	γ_b [-]	γ_d [-]	γ_m [-]	γ_R [-] (= $\gamma_n \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_m$)
Bishop	MC	Geen	1,13	1,11	1,0	1,0	1,25
Bishop	MC	Wel	1,13	1,11	1,1	1,0	1,38
UpLift Van	MC	Geen	1,13	1,11	0,95	1,0	1,19
UpLift Van	MC	Wel	1,13	1,11	1,05	1,0	1,32
Bishop	CSSM	n.v.t.	1,16	1,11	1,11	1,0	1,43
Uplift Van	CSSM	n.v.t.	1,16	1,11	1,06	1,0	1,36
Spencer	CSSM	n.v.t.	1,16	1,11	1,07	1,0	1,38

Tabel 9.10 Overzicht van berekende veiligheidsfactoren

Gedraineerde berekeningen – MC model

In onderstaande tabel zijn De maatgevende stabiliteitsfactoren bepaald met de methode Bishop en UpLift Van zijn uitgezet in Tabel 9.11. Bovendien staat de benodigde veiligheidsfactor vermeld.

Locatie	DWP	Opdrijven	SF Bishop	γ_R Bishop	SF UpLift Van	γ_R UpLift Van
Langerak West	254+076	Nee/Ja ¹²	1,32	1,38	1,25	1,32

Tabel 9.11 Toetsing van berekende stabiliteits- en veiligheidsfactoren voor een MC-model.

Ongedraineerde berekeningen – CSSM model

In onderstaande tabel zijn De maatgevende stabiliteitsfactoren berekend met de methode Bishop, Spencer en UpLift staan vermeld in Tabel 9.12.

¹¹ MC (Mohr-Coulomb) is de gedraineerde berekening en CSSM (Critical State Soil Model) de ongedraineerde berekening

¹² Het verschil in Langerak West tussen wel of niet opdrijven is minimaal. Theoretisch is er net geen opdrijven. De stabiliteit is dan voldoende ($\geq 1,19$). Indien de stijghoogte in de TZ laag circa 0,05-0,10 m hoger wordt treedt opdrijven op en voldoet de stabiliteitsfactor niet meer aan de vereiste factor van 1,32

Model	SF [-] (ongedraineerd CSSM)				Y _R [-]
	OCR = 1,0	OCR = 1,25	OCR = 1,5	OCR = 2,0	
Bishop	1,02	1,19	1,34	1,64	1,43
Spencer	1,06	1,21	1,38	1,68	1,38
UpLift Van	0,94	1,09	1,25	1,54	1,36

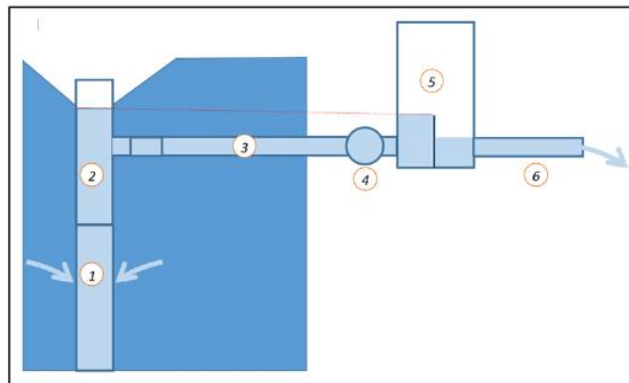
Tabel 9.12 Toetsing berekende stabiliteits- en veiligheidsfactor Langerak West DP. 254+076 – CSSM model

9.1.6 Ontwerp van maatregelen

De onttrekkingsputten van het drainagesysteem bestaan uit (PVC) stijgbuizen waarvan het onderste deel (1) is voorzien van perforaties. Het geperforeerde deel staat in de watervoerende TZ laag welke aanwezig is onder de klei/venige grondlagen. Rondom het geperforeerde deel is een grindfilter aanwezig. Ter hoogte van de cohesieve lagen is de stijgbuis (2) aangevuld met ondoorlatend materiaal, bijvoorbeeld microliet (zwel klei), zodat de lekkage langs de buis minimaal is. De bronnen zijn geplaatst in de berm of nabij de teen van de dijk.

De bronnen zijn groepsgewijs (streng met aantal bronnen, maximaal 10 stuks) met elkaar verbonden door een verbindingsleiding (3) en een verzamelleiding (4). Door deze leidingen stroomt het onttrokken water. De verzamelleiding loost het water via een overstortput (5) en een afvoerleiding (6) op een nabijgelegen sloot. Aan het eind van de afvoerleidingen zitten nabij het slootalud afsluitkleppen ter bescherming tegen dieren en plantengroei. Aan beide uiteinden van de verzamelleiding zitten doorspuitputten voor het verrichten van onderhoud. In onderstaande Het principe van een onttrekkingsput met de leidingen staat weergegeven in

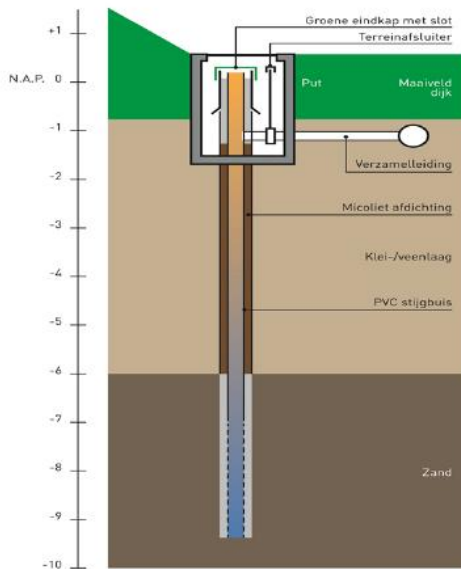
Figuur 9.14.



Figuur 9.14 Werking van een onttrekkingsput met leidingen (De Vries & van de Wiel, 2015)

- 1 = het geperforeerde filter in de TZ laag, diameter 160 mm, met grindfilter diameter 500 mm
- 2 = de stijgbuis in de cohesieve klei/venige lagen, diameter 160 mm
- 3 = de verbindingsleiding
- 4 = de verzamelleiding met aan uiteinden doorspuitputten (niet in figuur te zien)
- 5 = de overloop (overstort) put, het overloophoogte is regelbaar
- 6 = de afvoerleiding naar de sloot met afsluitkleppen

De opbouw van een onttrekkingsput staat weergegeven in Figuur 9.15.



Figuur 9.15 De opbouw van een onttrekkingsput voor grondwater (De Vries & van de Wiel, 2015)

Het overlopen, verzamelen en lozen van water gebeurt onder vrij verval. Een dergelijk drainagesysteem wordt een passief systeem genoemd want pompen zijn niet nodig.

Foto's van een aantal onderdelen van het drainagesysteem staan opgenomen in Figuur 9.16.



Plaatsen van de bronnen



Plaatsen van de bronnen



Maaiveld na plaatsing



PVC buizen bronnen



Overloop afstelstukken



Overstort put



Overloop afstelstukken en peilbuis



Put met deksel



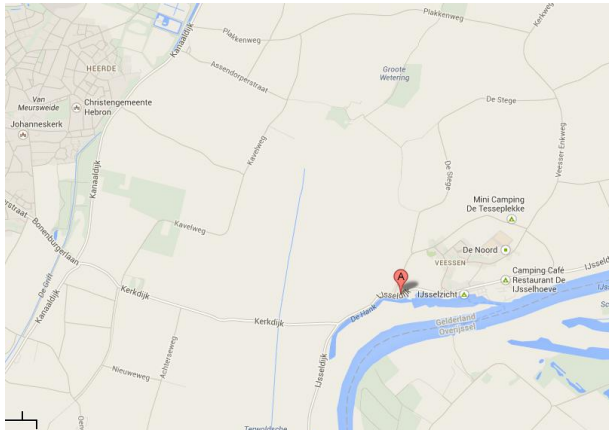
Put met deksel

Figuur 9.16 Impressie van onderdelen van een drainagesysteem bestaande uit verticale onttrekkingsputten en leidingen



9.2.2 Situatieschets

De primaire kering aan de westkant van de IJssel (voormalige dijkkring 52) is in de derde toetsronde op veiligheid afgekeurd voor een aantal trajecten op het faalmechanisme piping. De geografische ligging is weergegeven in Figuur 9.18.



Figuur 9.18 Geografische locatie IJsseldijk 11

Nabij de boerderij gelegen aan IJsseldijk 11 werd tijdens een gemiddeld hoogwater steevast een zandmeevoerende wel geconstateerd. Maatregelen om de veiligheid van het omringende gebied te vergroten waren noodzakelijk. De boerderij staat in de binnenteen van de kering. Aan de buitenzijde grenst de kering direct aan een hank (oude rivierarm) en deze hank is direct verbonden met de IJssel. Door aanwezige bebouwing in de kering en het zeer korte voorland, gaf deze locatie ruimtelijke beperkingen voor de aanleg van een grootschalige, traditionele versterking, zoals een pipingberm (zie Figuur 9.19). Waterschap Vallei en Veluwe was daarom op zoek naar een alternatieve versterkingsoplossing. Het DMC systeem bestaande uit horizontale drains is geschikt voor deze situatie omdat het de piping problematiek oplost zonder dat er bestaande gebouwen voor gesloopt moeten worden.



Figuur 9.19 Zijaanzicht IJsseldijk 11 met bebouwing langs de dijk

9.2.3 Systeemanalyse

De systeemanalyse brengt de piping problematiek gedetailleerd in beeld. Aan het einde van de systeemanalyse is bekend aan welke voorwaarden het DMC systeem moet voldoen, dus welke stijghoogte optreedt en welke stijghoogte mag voorkomen zonder dat er opbarsten (en daarmee ook piping) optreedt.



De maximale stijghoogte is berekend op basis van de gemodelleerde ondergrondschematisatie. De bijbehorende afvoercapaciteit wordt vervolgens met behulp van een modelmatige schematisatie bepaald.

9.2.3.1. *Ondergrondschematisatie*

De eerste stap in de systeemanalyse bestaat uit het berekenen van de kritieke stijghoogte voor het optreden van opbarsten en heave. Immers, wanneer de afdekkende laag niet opbarst, wordt piping voorkomen. Het berekenen van de kritieke stijghoogte is gedaan op basis van een schematisatie van de ondergrond, de kenmerken van de ondergrond en het maatgevende hoogwater in de IJssel (Spits, 2014).

Om te bepalen welk mechanisme van piping dominant is, zijn de kritieke stijghoogtes berekend voor zowel opbarsten als heave. Het maatgevende hoogwater (MHW) voor de projectlocatie is gegeven en was op het moment van berekenen 6,16 m + NAP. Dit komt overeen met een faalkans van $1/1.250^{13}$. Om de gegevens te verkrijgen is een boring uitgevoerd ter hoogte van de potentiële locatie van het DMC systeem. De grondopbouw uit de boring is uiteengezet per laag in Tabel 9.13.

¹³ In de derde toetsronde is de berekening nog zonder faalkansbegroting en lengte-effect, in de beoordeling conform WBI is de MHW voor de beoordeling 6,04 m + NAP



Bovenkant laag (m t.o.v. maaiveld)	Onderzijde laag (m t.o.v. maaiveld)	Beschrijving
0,00	0,20	Teelaarde
0,20	0,50	Zand, kleiig
0,50	1,00	Zand, matig siltig
1,00	1,60	Zand, zwak siltig
1,60	1,70	Klei, matig siltig
1,70	2,00	Klei, zwak zandig
2,00	2,38	Zand, zwak siltig, zwak grindig
2,38	2,43	Klei, sterk zandig
2,43	2,53	Klei, matig siltig
2,53	2,80	Zand, sterk siltig
2,80	3,20	Grind, zwak zandig
3,20	4,00	Zand, matig siltig
4,00	5,00	Zand, matig siltig

Tabel 9.13 Grondopbouw ten hoogte van IJsseldijk Veessen (Spits, 2014)

Er is aangenomen dat de laag op 2 m-mv direct in contact staat met de IJssel en daarmee watervoerend is. Dit is de maatgevende laag voor piping. Op basis van grondonderzoek bij Deltares zijn de grondeigenschappen van de maatgevende grondlaag bepaald. Daarbij is γ_{nat} vastgesteld op 17,7 kN/m³.

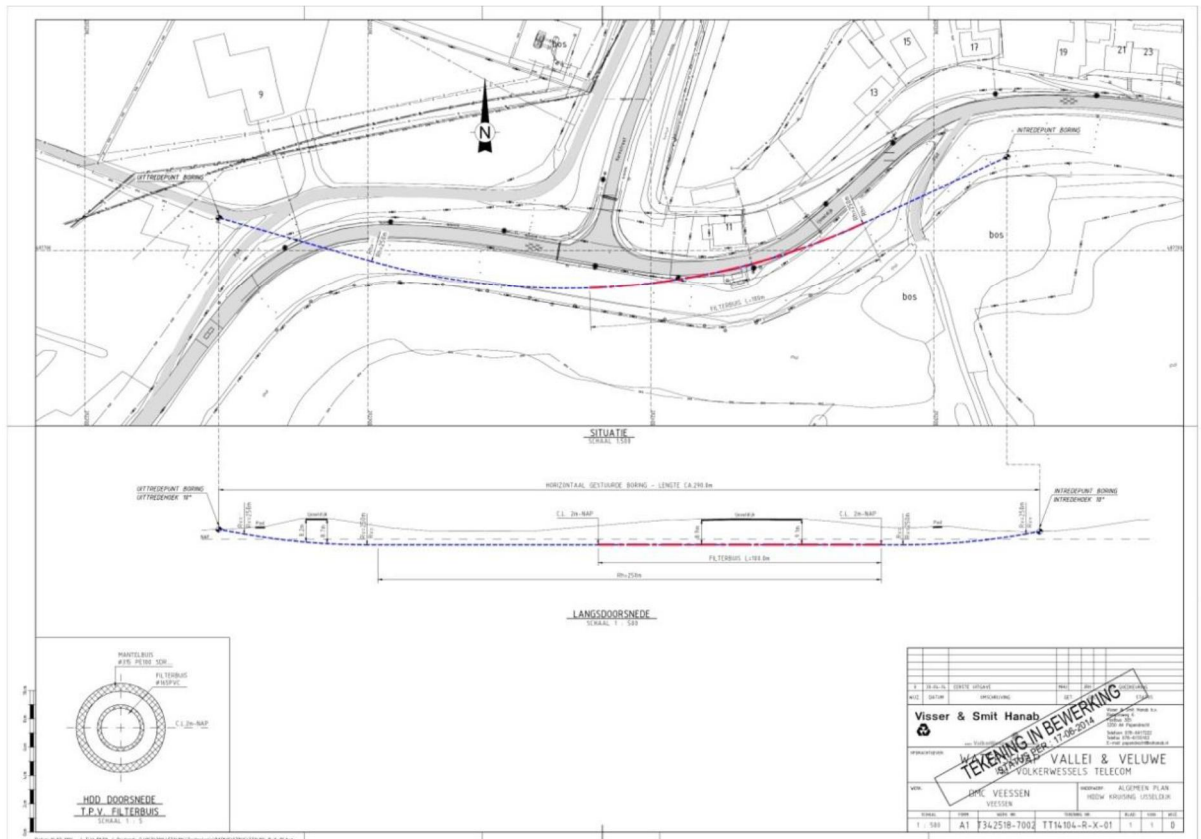
Op basis van het opbarst-criterium (TAW, 1999) en (Förster, van den Ham, Calle, & Kruse, 2012) is berekend dat de kritieke stijghoogte 5,54 m + NAP is. Voor het ontwerpen moet echter rekening worden gehouden met een veiligheidsfactor van 1,2. De kritieke stijghoogte waarop ontworpen moet worden is 5,28 m + NAP.

De kritieke stijghoogte voor heave wordt berekend op basis van het verhang van de waterlijn, deze mag maximaal 0,5 zijn. De maximale stijghoogte voor heave in de zandlaag tussen 3,0 en 1,62 m NAP komt daarmee op 5 m + NAP.

De stijghoogte voor de projectlocatie moet beperkt worden tot 5 m + NAP. Indien dit gerealiseerd wordt zal er geen opbarsten of heave plaatsvinden.

9.2.3.1. Modelschematisatie

De tweede stap in de systeemanalyse is het opstellen van een modelschematisatie waarmee de effecten van een DMC systeem worden berekend. Op basis van de beoordeling van VNK is een eerste ontwerp gemaakt voor het DMC systeem. Het traject is te vinden in Figuur 9.20.



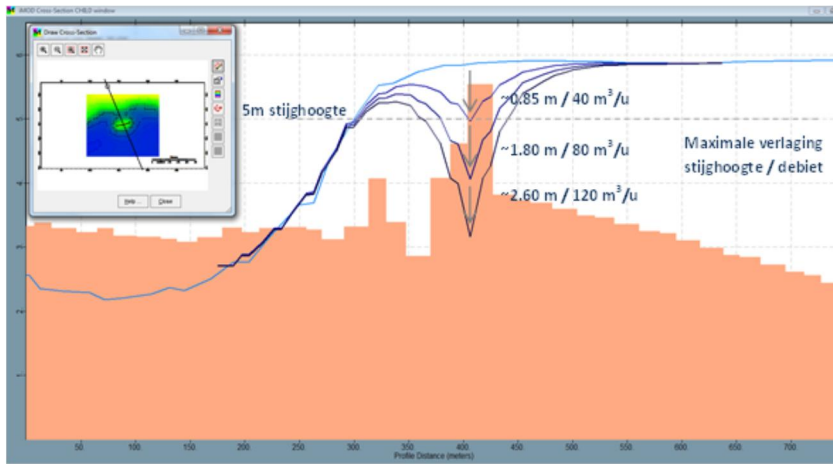
Figuur 9.20 Concept traject DMC systeem (van der Linden, 2014)

De locatie van het conceptontwerp is gemodelleerd met het MODFLOW grondwatermodel (van der Linden, 2014). Het DMC systeem is gemodelleerd door een vaste onttrekking toe te voegen in het model, zie Figuur 9.21.



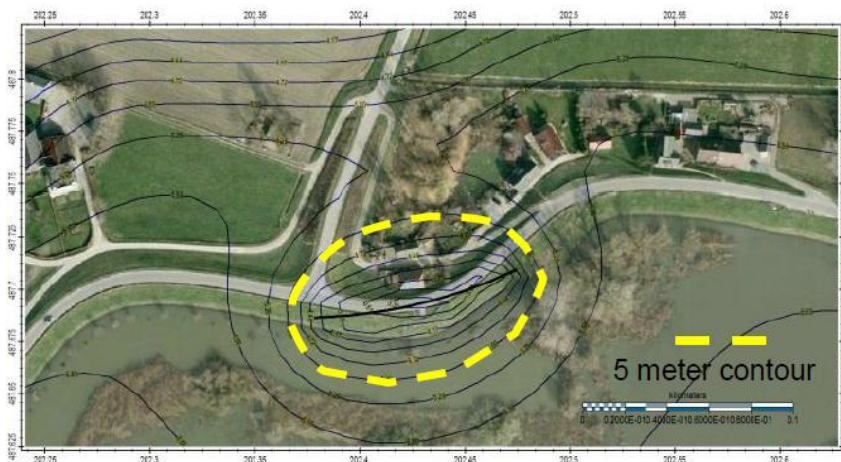
Figuur 9.21 Modellerings van het DMC systeem met een vaste onttrekking. De rekencellen in het paars hebben een vaste onttrekking (van der Linden, 2014)

Het effect van de onttrekking is vastgesteld in de dwarsrichting van de buis (zie Figuur 9.22) en in het platte vlak (zie Figuur 9.23).



Figuur 9.22 Resulterende stijghoogte bij een debietonttrekking van 40m 80 en 120 m³/u loodrecht op het DMC systeem (van der Linden, 2014)

In figuur 7 geeft De gele contour lijn geeft aan waar de stijghoogte 5 m+NAP is (Figuur 9.22). Vanaf de contourlijn in de richting de DMC buis, gelegen in het midden van de contourlijn, neemt de stijghoogte af. Hoewel de stijghoogte in het achterland uitkomt boven de 5 m+NAP, heeft dit geen gevolgen voor het faalmechanisme piping. Mocht opbarsten plaatsvinden, dan zal geen pipe ontstaan in de richting de dijk.



Figuur 9.23 3-D effect van de stijghoogte bij een onttrekking van 120 m³/uur (van der Linden, 2014)

Uit de modelschematisatie blijkt dat een afvoerdebiet van 88 m³/uur voldoende is om de stijghoogte onder de 5 m+NAP te houden.

9.2.4 Ontwerp

Het DMC wordt ontworpen voor de projectlocatie op basis van vier variabelen in het ontwerp. Als deze vier variabelen zijn afgestemd op de lokale omstandigheden is er een uitvoering gereed ontwerp die geïnstalleerd wordt.



9.2.4.1. Variabelen in het ontwerp

Het ontwerp van het systeem wordt bepaald door vier variabelen die worden afgestemd op de lokale eigenschappen. De variabelen zijn:

1. Afvoercapaciteit.
2. Lengte van de filterbuis.
3. Locatie van de filterbuis.
4. Filteropbouw.

9.2.4.1. Afvoercapaciteit

De afvoercapaciteit van het DMC systeem wordt bepaald door de diameter van de buis en de capaciteit van de afvoerpomp.

De diameter van de buis wordt ontworpen op basis van de benodigde afvoercapaciteit en de uitvoeringsaspecten. De filterbuis heeft vaste afmetingen voor de diameter, waar de meest geschikte diameter uit wordt gekozen.

Op basis van de benodigde afvoercapaciteit en de standaardmaten van de filterbuis is gekozen voor een diameter van 165 millimeter.

De afvoerpomp wordt aangezet indien het DMC systeem de stijghoogte onder vrij verval niet genoeg kan verlagen. Tevens wordt het autonome beheer van het DMC systeem door de pomp uitgevoerd. Het debiet van de pomp bij het DMC systeem in Veessen is 120 m³/uur. De pomp geeft een overcapaciteit, waardoor bij veranderende omstandigheden in de toekomst, bijvoorbeeld door een veranderende MHW.

9.2.4.1. Lengte van het DMC systeem

De lengte van de buis is bepaald op basis van het afgekeurde traject en de verwachte stijghoogte in het projectgebied. Voor het DMC systeem in Veessen is de effectieve lengte van het systeem op 100 meter vastgesteld.

9.2.4.1. Locatie

De locatie van de DMC buis wordt ontworpen met het oog op drie onderdelen:

1. Het functioneren.
2. De uitvoeringsaspecten.
3. De omgevingsaspecten.

Het functioneren van het DMC systeem is afhankelijk van de locatie en de diepte waar de drainage wordt geïnstalleerd. De locatie van de buis wordt bepaald aan de hand van de ondergrondschematisatie. Vooral de diepte (z) is hierin variabel. De filterbuis moet aangelegd worden in de diepte die watervoerend is. In Veessen is een watervoerende laag aanwezig op een diepte van 2 m-mv.

Naast de diepte voor het afvoeren van het overtollige water is de diepte tevens van belang ten aanzien van de uitvoeringsaspecten. Rekening moet bijvoorbeeld worden gehouden worden met de boorlijn van de uitvoering en de doorbaarheid van de ondergrond. Het filter wordt middels een horizontaal gestuurde boring aangelegd, waardoor werkruimte beschikbaar moet zijn. Voor Veessen vormde dit geen probleem.



Door de boorwerkzaamheden ontstaat verstoring in de ondergrond waardoor zettingen rond het boortraject kunnen optreden. De drainagebuis wordt vaak in de buurt van bebouwing aangelegd waardoor ook de zetting in de ondergrond moet worden meegenomen. Volgens de formule van Peck is er een verband tussen het volumeverlies in de ondergrond en de zettingstrog te leggen volgens onderstaande vergelijking.

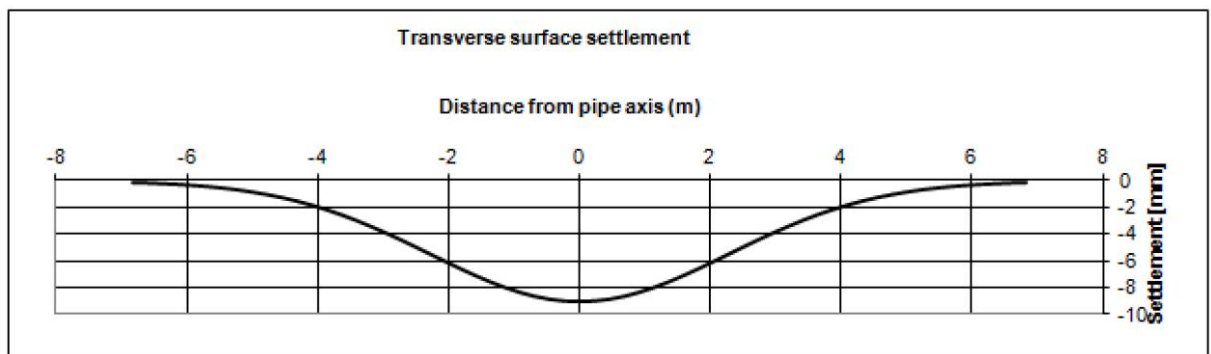
$$v = i * s_{max} \sqrt{2\pi}$$

Waarin:

v volume [m³]
i diameter van de buis [m²]
s_{max} maximale zetting [m]

De maximale zetting is waar te nemen op de locatie waar het DMC systeem geïnstalleerd is. De verzakking is echter over een grotere afstand waar te nemen. De zetting op afstand x (m) van de hartlijn van de boring is te berekenen onderstaande vergelijking.

$$s = s_{max} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)}$$



Figuur 9.24 Zettingen in dwarsrichting DMC systeem Veessen (Oldenhove, 2014)

De maximale zetting rond het boortraject wordt op 10 mm op de boorlijn verwacht, zoals is te zien in Figuur 9.24. Ter hoogte van de bebouwing is de zetting maximaal 2 millimeter. Dit is verwaarloosbaar in vergelijking met de natuurlijke zettingen die verwacht worden.

9.2.4.1. Filteropbouw

De zand-omstorting van de filterbuis is bedoeld om vuil uit omgeving af te vangen zodat de filterbuis niet verstopt raakt. De korrediameter van het zandfilter moet worden berekend om te zorgen dat het filter niet wegspoelt bij het maatgevende debiet. Het onttrekkingsdebiet is berekend met behulp van onderstaande vergelijking.

$$Q < \frac{k}{12} * A$$

Waarin:

Q debiet (m³/dag).
k doorlatendheid (m/dag)
A oppervlak boorgatwand (m²)



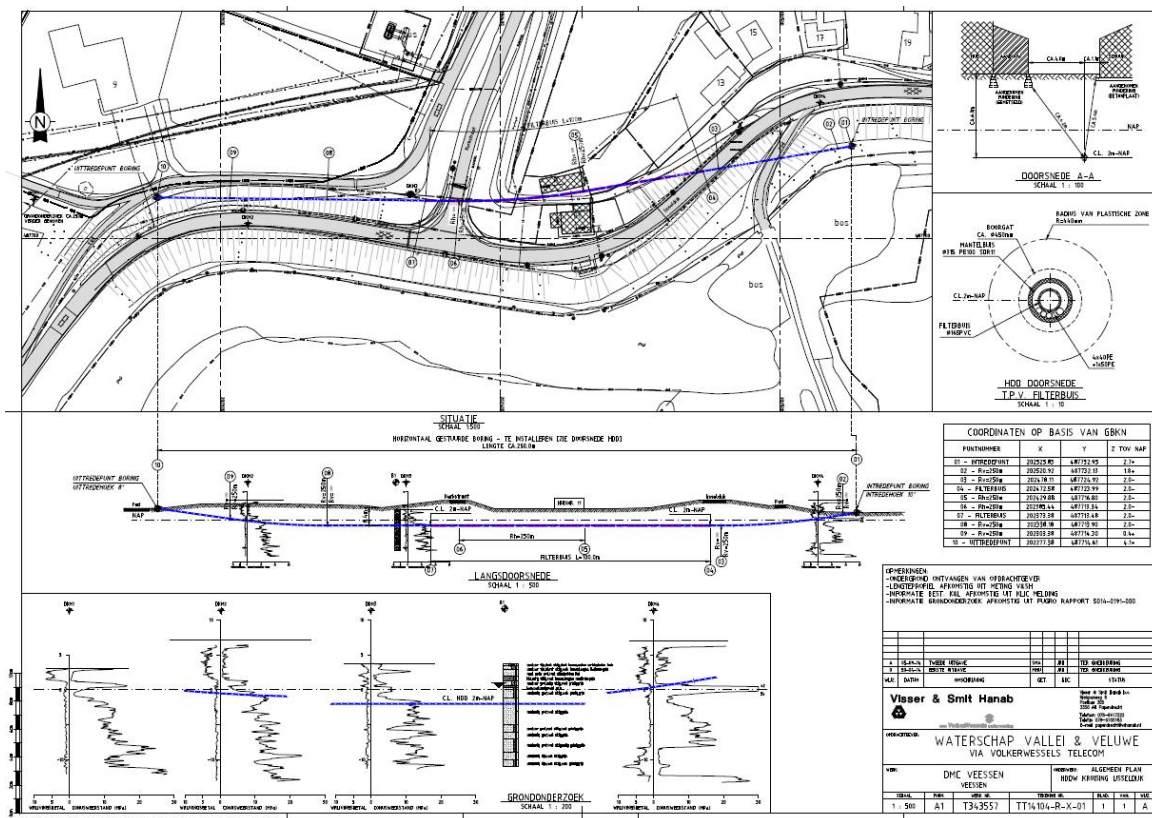
De doorlatendheid van de ondergrond is gekozen in overeenstemming met de waarde gehanteerd in het MODFLOW model en dat is 18 m/dag (Rothuizen, 2014). De doorlatendheid van het zandpakket wordt hiermee gelijk gesteld aan de doorlatendheid van de omgeving. De diameter van de drainagebuis is 465 mm en de filterlengte is 100 meter. Het onttrekkingsdebiet bedraagt dan:

$$Q = \frac{18}{12} * (0,465 * \pi * 100) = 220 \text{ m}^3/\text{uur}$$

Het DMC systeem heeft een maximale capaciteit van 88 m³/uur, waarmee een doorlatendheid van het zandpackage van 18 m/dag voldoende is om geen zandlevering te krijgen. Ook bij eventuele toekomstige omstandigheden waarbij de capaciteit van 120 m³/s wordt gebruikt is er nog geen kans op zandlevering.

9.2.4.1. Uitvoering gereed ontwerp

Het ontwerp zoals het gerealiseerd gaat worden is te zien in Figuur 9.25.



Figuur 9.25 Het ontwerp gereed voor de uitvoering

9.2.5 Monitoring

Monitoring is ingesteld om het beheer en onderhoud te optimaliseren en te leren van de ontwikkelingen. Tevens werkt het DMC systeem grotendeels autonoom, waardoor een gedegen monitoring belangrijk is. Voor de werking van het DMC systeem worden de volgende onderdelen gemonitord:

1. Het afgevoerde debiet.
2. De stijghoogte ter hoogte van de buis.



Bij Veessen een peilbuis als referentie geplaatst buiten het verwachte invloedsgebied van het DMC systeem. De peilbuis dient ter validatie van de peilbuizen ter hoogte van het DMC systeem. Tevens kan met behulp van de referentiepeilbuis de werking van het DMC systeem gemonitord worden, omdat er theoretisch een significant verschil in stijghoogte aanwezig is tussen een peilbuis buiten het invloedsgebied en een peilbuis ter hoogte van het DMC systeem.

Indien de stijghoogte ter hoogte van het DMC systeem uitkomt boven 1,5 m+NAP, dan wordt een eerste melding gegeven. In de melding wordt geattendeerd op een hoogwatersituatie ter hoogte van Veessen.

9.2.6 Beheer en onderhoud

Het waterschap Vallei en Veluwe is verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van het systeem. De afdeling Beheer en de afdeling Onderhoud functioneren los van elkaar.

De afdeling Beheer controleert de werking van het DMC systeem en zorgt dat de werking gegarandeerd blijft. Er is een beheerder van de kering en een beheerder van de technische installaties. De beheerder van de kering is verantwoordelijk voor de werking van de afvoerende functie van het drainagesysteem. Dat betekent dat de watergangen waar het systeem op afvoert, voldoende capaciteit hebben en dat geldt ook voor het DMC systeem zelf.

De beheerder van de installaties is verantwoordelijk voor de werking van de technische installaties zoals de sensoren, de pomp en de schakelkast. Het vervangen (periodiek en incidenteel) van onderdelen van het DMC systeem wordt gedaan door de afdeling onderhoud.

Het DMC systeem monitort en controleert zijn eigen functioneren. Zo wordt er gemonitord en gerapporteerd over afvoercapaciteit en stijghoogte. In Veessen wordt er tevens een waarschuwing gegeven als de stijghoogte hoger komt dan 1,5 m+NAP. Als de stijghoogte uitkomt boven 2,75 m + NAP dan wordt het DMC systeem automatisch geactiveerd. Indien dat wenselijk wordt geacht, kan het systeem ook handmatig worden ingeschakeld door de beheerder. De capaciteit van het systeem wordt automatisch getest door een testrun in te stellen met een vooraf ingesteld interval. De resultaten van de test zijn online te controleren.

Voor de installatiebeheerder worden automatische meldingen gegenereerd die aangeven of er bijvoorbeeld een sensor buiten bereik is, of als de pomp wordt geblokkeerd. Tevens wordt de werking van de pomp en de werking van de sensoren online gecontroleerd. In situ wordt halfjaarlijks de staat van de installatiekast gecontroleerd. De afdeling onderhoud krijgt automatisch een melding als onderdelen defect zijn, zoals een sensor of de afvoerpomp. Tevens wordt de afdeling onderhoud ingeschakeld indien de afdeling beheer de storing niet kan oplossen, en er nieuwe onderdelen moeten worden geïnstalleerd.

9.3 Rivierdijk III – Spijk (Rijn) – Grindkoffer



Figuur 9.26 Foto grindkoffer Spijkse Dijk (foto: Waterschap Rijn en IJssel)

In 1973 is een grindkoffer aangelegd bij Spijk langs de Bovenrijn, tussen dijkpaal 8 en 26,5 met een totale lengte van 1,8 km. De locatie ligt in het beheergebied van het Waterschap Rijn en IJssel. Het ontwerp van de grindkoffer is opgesteld voordat deze Technische Richtlijn werd opgesteld, en volgt daarom de werkwijze niet. In onderstaande paragrafen worden enkele relevante keuzes in het ontwerp, aanleg en beheer toegelicht.

9.3.1 Beschrijving – grondopbouw en geohydrologie

Bij aanvang van de ontwerpwerkzaamheden is een veldwerk programma uitgevoerd (van Eyden & Schuurmans, 1971) over het dijktraject tussen dijkpaal 0 en 40 (4 km lengte), dit omvat:

- Uitvoeren van 15 boringen over 5 raaien.
- Plaatsen van peilbuizen op 11 locaties met in totaal 43 filters.
- Uitvoeren van doorlatendheidsproeven op 70 grondmonsters.

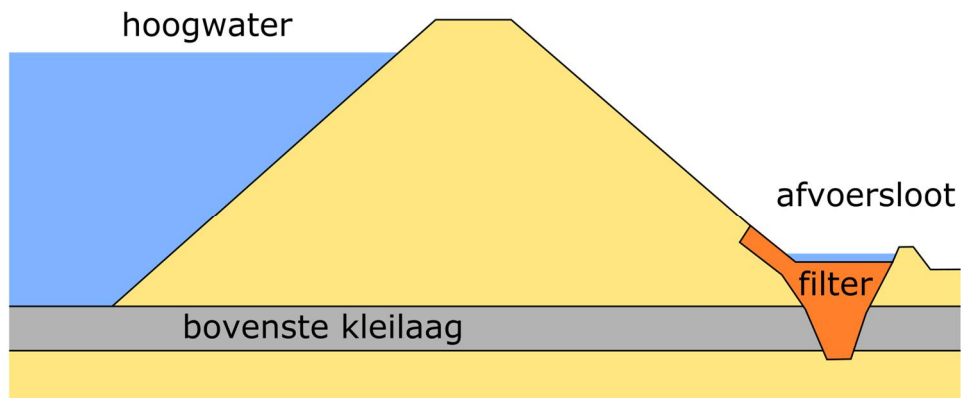
Door het veldwerkprogramma is de dikte van de afsluitende deklaag inzichtelijk gemaakt, en is de opbouw van het onderliggende watervoerende pakket in beeld. Door het uitblijven van een hoogwatergolf tijdens de meetperiode kon via de nieuw geplaatste peilbuizen geen inzicht worden verkregen in de geohydrologische omstandigheden tijdens hoogwater. Daarom zijn hiervoor historische waarnemingen in nabij gelegen peilbuizen gebruikt. Dit onderstreept de nut en noodzaak van een regionaal monitoringsnetwerk met relevante en gevalideerde waarnemingen.

9.3.2 Uitwerking

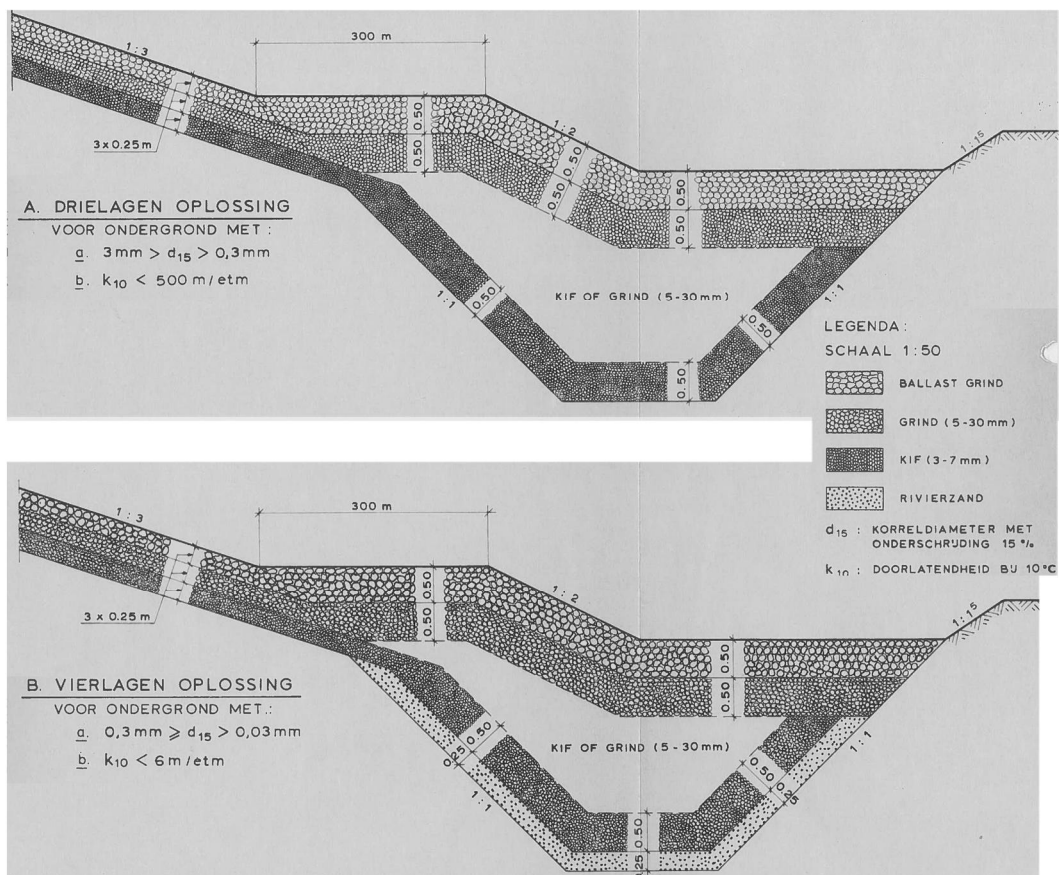
Geschikte locaties voor een grindkoffer zijn geselecteerd op basis van de mogelijkheden om het uittredende water af te voeren en de mogelijkheden om de dijk conventioneel te versterken. Dit betekent dat over 1,8 km van het traject van 4,0 km een grindkoffer wordt ontworpen. Tijdens het ontwerp is ervoor gekozen om via de grindkoffer zowel het dijklichaam als het watervoerende pakket te draineren.

9.3.3 Ontwerp van maatregelen

Onderstaande afbeelding geeft een schematische doorsnede weer van het ontwerp. De volgende afbeelding geeft de gelaagde opbouw van de grindkoffer zelf weer. Voor trajecten met een korreldiameter (d_{15}) van het watervoerende pakket van kleiner dan 0,03 mm wordt eerst een laag rivierzand toegepast.



Figuur 9.27 Schematische doorsnede dijk met grindkoffer, naar (Nagtegaal & Beijersbergen, 1980)



Figuur 9.28 Opbouw grindkoffer (van Eyden & Schuurmans, 1971)

Bij de aanleg van de grindkoffer is specifieke aandacht besteed aan het geheel verwijderen van kleilagen, zodat de grindkoffer volledig contact maakt met het watervoerende pakket.



9.3.4 Beheer

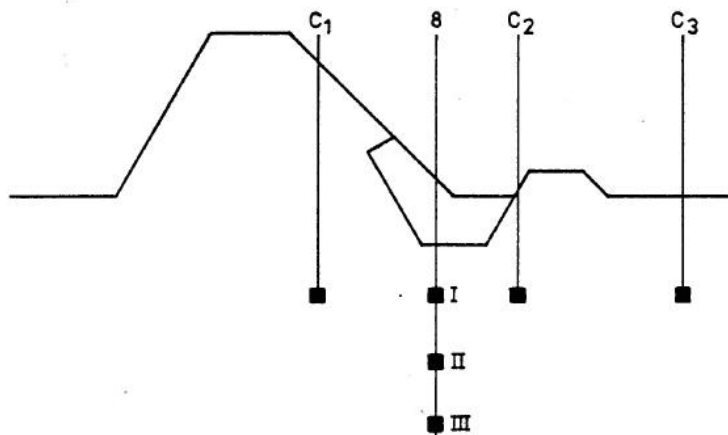
Het beheer door waterschap Rijn en IJssel is beschreven door Arends en Niemeijer (2014), namelijk:

- Door het waterschap wordt tweemaal per jaar handmatig het onkruid verwijderd. Dit om verspreiding van de zaden naar andere gebieden te beperken. Maaien met een grasmaaimachine blijkt niet mogelijk te zijn.
- Het grindoppervlak blijkt aantrekkelijk te zijn voor crossmotoren en quads. Dit is voor de werking niet bezwaarlijk, als het filter voldoende robuust is opgebouwd en zolang er geen diepe sporen ontstaan. Indien dit (ongewenste) recreatieve medegebruik niet voorkomen kan worden, dan is met enige regelmaat herprofilering nodig.

Het functioneren van de grindkoffer is op de volgende 3 momenten gemonitord.

Geohydrologische analyse

Het functioneren van de grindkoffer is geanalyseerd op basis van het hoogwater in 1979 en 1980 (Nagtegaal & Beijersbergen, 1980). Hiervoor zijn waarnemingen gedaan van het waterpeil in de sloot op 3 locaties en in peilbuizen die in 3 raaien zijn geplaatst. Een schematisch overzicht is opgenomen in onderstaande figuur. Daarna is modelonderzoek uitgevoerd door twee traditionele methoden (Teledeltospapier en een elektrisch model) die in 2017 niet meer courant zijn.



Figuur 9.29 Schematische doorsnede dijk met filterstelling peilbuizen (Nagtegaal & Beijersbergen, 1980)

Grondradar

Via een grondradar is onderzocht hoe de grindkoffer functioneert (de Feijter, 1985). Het onderzoek is uitgevoerd tijdens hoog en laag water. Naast het radaronderzoek zijn inspecties nodig om de resultaten te verifiëren.

Tijdens hoogwater waren er moeilijkheden om door de grondwaterspiegel heen te kijken omdat deze bij Spijk schuin ten opzichte van het maaiveld ligt. Boven de grondwaterstand is verstoring in het grindpakket waargenomen. Uit onderzoek blijkt dat fijne grond in het filter aanwezig was, mogelijk door het aanbrengen van peilbuizen. Tijdens laag water kunnen de grenzen van het filter worden waargenomen.



Boringen

Voor de tweede toetsing is de werking van het filter onderzocht (Koopmans, 2004). Hiervoor zijn boringen op verschillende dieptes uitgevoerd, en zijn zeefkrommes in het laboratorium bepaald. Volgens de zeefkrommes voldoet het filter op 2 plaatsen niet geheel aan de filterregels. Mogelijk is tijdens het boren de laagopbouw verstoord (Arends en Niemeijer, 2014). Daarom wordt vanuit deze Technische Richtlijn geadviseerd om boorwerkzaamheden in een grindkoffer alleen uit te voeren met een casing in het boorgat zodat verstoring van het monster wordt voorkomen.



10 Aanbevelingen

Drainagetechnieken worden in Nederland regelmatig toegepast, bijvoorbeeld in de landbouw voor de ontwatering. Toepassing van drainagetechnieken als maatregel om piping en macro-instabiliteit te ondervangen staat nog in de kinderschoenen. Toch is er al veel bekend op het vlak van ontwerpen, realiseren, beheren, onderhouden beoordelen en monitoren. De beschikbare kennis is samengebracht in deze technische richtlijn.

Bij de afronding van dit rapport is het goed om ook stil te staan bij onderdelen of onderwerpen die nog onvoldoende uit de verf zijn gekomen. Het zijn deze onderwerpen waar de aanbeveling aan verbonden kan worden om aandacht aan te geven bij een toekomstige versie van de technische richtlijn.

Een centrale positie binnen de technische richtlijn wordt ingenomen door faalscenario's. Deze faalscenario's dienen verder te worden uitgewerkt, iets dat voor ieder project individueel gedaan moet worden. Het verdient aanbeveling om de ervaringen die daarbij worden opgedaan te bundelen en beschikbaar te stellen. De faalscenario's worden uitgewerkt in een foutenboom. Het is verstandig om faalkansen van componenten van leidingsystemen te gaan verzamelen en te komen tot een 'bibliotheek' aan faalkansen. Hiermee wordt gewerkt aan uniformiteit en bovendien komen resultaten van voortschrijdend inzicht na opgedane kennis meteen beschikbaar voor de hele sector. Het is belangrijk om minimaal een voorbeeld te krijgen waar de uitwerking van de veiligheidsfilosofie voldoet aan de eis voor waterveiligheid.

Voorzien wordt dat de praktijk mogelijkheden biedt voor het verkleinen van faalkansen. Deze mogelijkheden dienen zich aan in het combineren van ontwerpen, realiseren, monitoren, beheren en onderhouden. Deze opgedane ervaringen, mede door toepassen van life cycle monitoring, dienen een plek te krijgen in een toekomstige technische richtlijn.

In andere werkvelden is veel kennis beschikbaar over ontwerpen en realiseren van een onttrekking. In deze TR is een aanzet gegeven. De indruk is dat er nog veel meer informatie in andere werkvelden beschikbaar is, bijvoorbeeld in de drinkwaterindustrie. Deze informatie dient verder ontsloten te worden. Dit geldt vooral voor kennis met betrekking tot beheer en onderhoud van filters, inclusief opgedane ervaringen met dichtslibben, kennis over faalkansen of het falen van componenten.

Voorbeelden over de wisselwerking tussen geohydrologie en geotechniek zijn nog niet beschikbaar. Dit geldt ook voor voorbeelden waar een geohydrologisch model gekalibreerd is aan de hand van een situatie met hoogwater op de rivier. Dit zijn prima onderwerpen om aandacht aan te geven in de nabije toekomst.

Naar verwachting zal er in de nabije toekomst nog meer ervaring worden opgedaan bij het ontwerpen en realiseren van een drainagemaatregel. Deze 'lessons learned', zijn waardevol en dienen opgenomen te worden in een toekomstige uitgave, bijvoorbeeld als uitbreiding of verdieping van hoofdstuk 9. Dat geldt evenzeer voor de onderdelen beheer en onderhoud. Daarbij ook letten op de wateroverlast die kan optreden. Hoewel wateroverlast uiteraard te verkiezen is boven een overstroming, zorgt het wel voor (maatschappelijk) ongemak. Bovendien zal ervaring worden opgedaan met de uitbreidbaarheid (adaptief) van een drainagesysteem in een ontwerp, maar wellicht ook al in de praktijk.



In de nabije toekomst wordt voor verschillende drainagetechnieken gewerkt aan de totstandkoming van een 'Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn' (OBR). Het is dan zaak om deze OBR's te integreren in deze technische richtlijn (TR).

Momenteel wordt gewerkt aan een aanbeveling over life cycle monitoring. Naar verwachting komt de rapportage binnenkort beschikbaar. De bevindingen uit deze werkzaamheden dienen vervolgens een plaats te krijgen in de verschillende technische richtlijnen waaronder deze TR Drainagetechnieken.

De technische richtlijn bevat een voorstel voor een stappenplan. In de nabije toekomst zal ervaring worden opgedaan in het werken met het stappenplan. De opgedane ervaring kan dan worden verzameld en eventueel aanleiding zijn om te komen tot een bijstelling van het stappenplan.

In de technische richtlijn is geen rekening gehouden met het lengte-effect. In het vervolg dient de theoretische onderbouwing van het lengte-effect te worden uitgewerkt. Ook de Life Cycle Costs (LCC) dienen nog te worden uitgewerkt. Vervolgens kunnen ervaringen worden gedeeld.



Literatuur

- Arcadis. (2010). *Stappenplan schematiseringsfactor*. Rapport, Rijkswaterstaat - Waterdienst, rapport. C03011.000049, 11 juni 2010, 43 bladzijden.
- Arends en Niemeijer. (2014). *Evaluatie bestaande drainagetechnieken als oplossing voor piping*. Arcadis, Rapport, 07754137:0.1, 14 februari 2014, 20 bladzijden plus Bijlagen.
- Baligh, M., & Levadoux, J.-N. (1980). *Pore pressure dissipation after cone penetration*. MIT Cambridge, MA: MIT-Report No. 80-11, Order No. 662, Depart. of Civil Eng., .
- Bauduin, C., & Barends, F. (1988). *Getijderespons in grondwater onder Nederlandse dijken . H2O, Volume 21, Nr. 1.*
- Beijer, W. (1964). *Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. Wasserwirtschaft u. - technik 14.*
- Berendsen, H. (2004). *De vorming van het land - inleiding in de geologie en de geomorfologie*. Koninklijke van Gorkum B.V., 9789023240754, oktober 2004, 410 bladzijden.
- Bonte, M., Wols, B., Maas, K., & Stuyfzand, P. (2017). Sources of dissolved oxygen in monitoring and pumping wells. *Journal of Hydrogeology, Volume 25, DOI 10.1007/s10040-016-1477-9*, 55-66.
- Bot, A. (2011). *Grondwaterzakboekje*. Rotterdam: Drukkerij de Maasstad.
- BRO. (2017). *Opgeroepen op 02 23, 2017, van Basisregistratie Ondergrond: https://bro.pleio.nl/*
- Cohen, K., Stouthamer, E., Hoek, W., Berendsen, H., & Kempen, H. (2009). *Zand in banen - Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel*. Utrecht: Universiteit Utrecht, 3e hersiene druk, 130 bladzijden.
- CUR247. (2013). *Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek van planfase tot realisatie . Delft: CUR, Rapport, C247, 2014 bladzijden.*
- de Feijter, J. (1985). *Samenvatting grondradaronderzoek aan de filterconconstructie Spijkse Dijk*. LGM, Rapport TFG .
- de Groot, B., & Meuwese, H. (2017). *Drainagesysteem in de verkenning (HWBP POV Piping)*. Deventer: Witteveen+Bos en RPS, Rapport, HTN117-1/17-000.672, 17 januari, 29 bladzijden.
- De Vries & van de Wiel. (2015). *Ontwerpnota SLA*. Rapport, versie 4.0, februari 2015.
- Deltares / TNO. (2008). *Grondwatermodellering Rivierenland*. rapport 2008-U-R0827/A.
- Deltares. (2013). *CIP Integrale afweging piping - evaluatie geohydrologische maatregelen als oplossing voor piping*. RWS-WVL, Corporate Innovatie Programma, Rapport, 1207938-005-VEB-0002, 17 december 2013, 85 bladzijden.
- Deltares. (2013b). *Het pipingproces in stripvorm*. RWS-WVL, Rapport, 1207304-000-GEO-0007, 15 april 2013, 28 bladzijden.
- Deltares. (2014). *Herkalibratie MORIA*. Rapport 1208395-000-BGS-0010.
- Deltares. (2015). *Werkwijzer bepaling hydraulische ontwerpvoorwaarden: OI2014 versie 3, voor HWBP 2015 projecten*. RWS-WVL, Rapport, 1210420-000-HYE-0007, maart 2015, 46 bladzijden.
- Deltares. (2016a). *Metingen grondwatersysteem Perkpolder en werking kwelvoorziening - rapportage meetjaren 2014 en 2015*. Delft: Deltares, Rapport 1210613-000, 25 januari 2016, definitief, 45 bladzijden.
- Deltares. (2016b). *D-Soil Model, Ondergrondschematiseringsproces voor geotechnische toepassingen, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Delft: Rapport, versie 1.1, Revisie 49014, 14 december 2016, 72 bladzijden.



- Deltares. (2016c). *Werkwijzer bepaling hydraulische randvoorwaarden - Aanvulling OI2014, versie 4*. Delft: Deltares, Rapport, 1230090-009, versie 3, 22 december 2016, 81 bladzijden.
- ENW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. RWS-DWW, Rapport DWW-2004-057, 1 september 2004, 208 bladzijden.
- ENW. (2007a). *Technisch Rapport - Ontwerpbelastingen voor het Riviereengebied*. Ministerie van V&W, Rapport juli 2007, 148 bladzijden.
- ENW. (2007b). *Addendum bij het technisch rapport waterkerende grondconstructies*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, rapport, juli 2007, 38 bladzijden.
- ENW. (2012). *TR Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*. Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving, rapport, oktober 2012, 69 bladzijden.
- ENW. (2016). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. ENW, rapport, december 2016, 145 bladzijden.
- Förster, U., van den Ham, G., Calle, E., & Kruse, G. (2012). *Zandmeevoerende Wellen*. Deltares, Rapport, 1202123-003, maart 2012, 324 bladzijden.
- Gunnink, J., Maljers, D., Gessel, S. v., Menkovic, A., & Hummelman, H. (2013). Digital Geological Model (DGM): a 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. *Netherlands Journal of Geoscience*, Volume 92-1, bladzijden 33-46.
- Helpdesk Water. (2016). *Beoordelen (WBI)*. <http://www.helpdeskwater.nl/>.
- Hemker, C. (1984). Steady Groundwater Flow in Leaky Multiple Aquifer Systems. *Journal of Hydrology*, Volume 72, pages 355-374.
- Hemker, K., & Randall, J. (2013). *Modelling with MLU - applying the multilayer approach to aquifer test ananlysis - tutorial*. Amsterdam-Seattle: june 2013, 66 pp.
- Hijma, M., & Lam, K. (2015). *Globale Stochastische Ondergrondschematisatie voor primaire waterkeringen*. Delft: Deltares, Rapport 1209432-000-GEO-0006, 24 september 2015.
- HKV. (2017). *Rapport Hydraulische randvoorwaarden SLa*. Rapport, januari 2017, inclusief toelichting d.d. 13 juli 2017.
- Houben, G. (2015, September 26). Review: Hydraulics of water wells - head losses of individual components. *Journal of Hydrology*, pp. Volume 23, pp. 1659-1675.
- Huisman, L. (1972). *Groundwater Recovery*. London: The Macmillan Press, 1st edition, 1972, 336 pages.
- Hvorslev, M. (1951). *Time lag and soil permeability in groundwater observations*. Vicksburg, Mississippi: Corps of Engineers, bulletin no. 36, 57 pages.
- ISO. (2012a). *Geotechnical investigation and testing — Geohydraulic testing — Part 2: Water permeability tests in a borehole using open systems*. ISO, ISO-DIS 22282-2.
- ISO. (2012b). *Geotechnical investigation and testing -- Geohydraulic testing -- Part 6: Water permeability tests in a borehole using closed systems*. ISO, ISO-DIS 22282-6.
- ISO. (2012c). *Geotechnical investigation and testing — Geo Hydraulic testing — Part 4: Pumping tests*. ISO-DIS 22282-5.
- Koelewijn, A., & van der Meer, M. (in press). *Blauwdruk Handreiking Life Cycle Monitoring*. POV-M, rapport, nog te verschijnen.
- Kooistra, K. (2014). *Aanleg & Onderhoud van drainage*.
- Koopmans, R. (2004). *Tweede Toetsing dijkkring 48*. Grontmij, projectnummer 163597.
- Kruseman, G., & de Ridder, N. (1994). *Analysis and evaluation of pumping test data*. ILRI, volume 47, 2nd edition, 377 bladzijden.
- KWR. (2011). *Kennisdocument Putten(velden) - Ontwerp, Aanleg en Exploitatie van pompen waarnemingsputten*. Nieuwegein: KWR, Rapport, 2011-014, update december 2011, 318 bladzijden.
- Lunne, T., Robertson, P., & Powell, J. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. New York: Blackie Academic / Routledge Publishing.



- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016a). *Wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten*. Wet 34436, voorjaar 2016, 27 bladzijden.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016b). *Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit - WBI 2017*. RWS-WVL, Rapport, definitief, versienummer 1.0, 1 september 2016, 169 bladzijden,.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017a). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen*. RWS, WVL, 1 januari 2017.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017b). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Nagtegaal, G., & Beijersbergen, J. (1980). *Controle drainageconstructie Spijkse Dijk*. Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, rapport A-77.081.
- Naudin - Ten Cate e.a., R. (2000). *Cultuurtechnisch Vademecum - Handboek voor inrichting en beheer van land, water en milieu*. Doetichem: Elsevier, 1090 bladzijden.
- NEN. (2003). *Underground pipelines - Basic principles for strength calculation*. NEN, Rapport, NPR 3659:1996/A1:2003 nl.
- NEN. (2010). *Geotechnisch onderzoek en beproeving - Methoden voor monsterneming en grondwatermeting - Deel 1: Technische grondslagen voor de uitvoering*. NEN, NEN-EN-ISO 22475-1:2006/C11:2010 nl.
- NEN. (2012). *NEN 3651*. Delft: NNI, Rapport, juni 2012, 104 bladzijden.
- NEN. (2013). *Geotechnisch onderzoek en beproeving - Veldproeven - Deel 1: Elektrische sondering met en zonder waterspanningsmeting*. Delft: NEN, Rapport, NEN-EN-ISO 22476-1/C1, 1 januari 2013, .
- Oasen. (2006). *Voorkomen en verwijderen van putverstopping door deeltjes op de boorgatwand - Richtlijnen voor ontwerp, realisatie, bedrijfsvoering en regeneratie van pompputten*. Nieuwegein: KIWA N.V., Rapport, ISBN: 90-74741-89-4, 69 bladzijden.
- Oldenhav, A. (2014). *Invloed HDDW op bebouwing*. Papendrecht: Visser & Smit Hanab.
- Phernambucq, I. (2015). *The vertical hydraulic resistance of the Lek River and consequences for travel times*. Utrecht: Universiteit Utrecht, Oasen, Master Theses, 2015 June 25th, 101 pages.
- Rijkswaterstaat. (2016). *Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014*. RWS-WVL, rapport, versie 1, definitief, december 2016, 102 bladzijden.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen*. RWS-WVL, Rapport, versie OI2014v4, februari 2017, versienummer 4, Definitief, 71 bladzijden.
- Rijkswaterstaat VNK. (2014). *De veiligheid van Nederland in kaart*. Rijkswaterstaat projectbureau VNK, HB 2540621, november 2014, 120 bladzijden.
- Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2016b). *Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit - WBI 2017*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rapport, definitief, versienummer 2.1, 1 december 2016, 173 bladzijden.
- Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2016c). *Schematiseringshandleiding Afschuiving Voorland*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rapport, Versie 2.0, Definitief, 1 december 2016, 48 bladzijden.
- Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2017). *Schematiseringshandleiding piping*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rapport, definitief, versienummer 2.2, 2 januari 2017, 118 bladzijden.
- Rinsema, J. G., ter Brake, C. K., Bos, H., Wiering, H., & Rothuizen, R. (in press). *Ontwerp- en Toetsvoorschrift DMC systeem*. Utrecht: ENW.
- RIONED. (2015). *Doorlatendheidsonderzoek voor infiltratie en drainage*. Leidraad riolering, Module C2510, maart 2015, 92 bladzijden.



- Rothuizen, R. (2014). *Filterspleet en gravel pack HDDW Veessen*. Papendrecht: Visser & Smit Hanab.
- Schoofs, S., & van Duinen, T. (2006). *Indringing van waterspanning in samendrukbare gelaagde grondpakketten - Uitwerking voor de Lekdijken in de Alblaserwaard*. Geotechniek, 10, nummer 1, pagina 40.
- Sellmeijer, J. (1988, October). On the mechanism of piping under impervious structures. Delft, The Netherlands: TU-Delft.
- Spits, L. (2014). *Opbarsten en heave berekening ten behoeve van aanleg DMC-systeem*. Delft: Deltares.
- Stoevelaar, R., van Duinen, A. (2016). *Protocol sonderen voor su-bepaling*. Delft: Deltares, Rapport, definitief, versie 3, 1220083-010, 1 juni 2016, 33 bladzijden.
- STOWA. (2000). *Onderhoud drainageconstructies in waterkeringen*. Rapport 2000-18.
- STOWA. (2015). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen*. STOWA Rapport 2015-15, 104 bladzijden.
- TAW. (1985). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken - Deel 1 - bovenrivierengebied*. Den Haag: Staatsuitgeverij, 1985, 228 bladzijden.
- TAW. (1989). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken - Deel 2 - Benedenrivierengebied*. 's-Gravenhage: Waltman, Delft, rapport, september 1989, 196 bladzijden.
- TAW. (1999). *Technische Rapport - Zandmeevoerende wellen*. Rapport, TR 15, maart 1999, 162 bladzijden.
- TAW. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies - Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkades*. Den Haag: Rapport TR-19, 302 pp.
- TAW. (2003). *Leidraad Kunstwerken*. Delft: DWW, rapport, mei 2003, 313 bladzijden.
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. RWS-DWW, Rapport 2004-057, 1 september 2004, 2008 bladzijden.
- TNO. (2016). *DINOloket - Data Informatie van de Nederlandse Ondergrond*. Opgehaald van <https://www.dinoloket.nl/>.
- TNO. (2016). *GeoTOP*. Opgehaald van DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>
- TNO. (2016). *REGIS-II*. Opgehaald van DINOloket: <http://www2.dinoloket.nl/nl/about/modellen/regist.html>
- US Army Corps of Engineers. (1992). *Design, Construction, and Maintenance of Relief Wells*. Rapport, CECW-EG, 1110-2-1914, 29 mei 1992, 92 bladzijden.
- van der Geest Grondwerk. (2017). *mondelinge mededeling*. Aannemersbedrijf van der Geest.
- van der Linden, W. (2014). *Debiet berekening DMC-systeem Veessen*. Delft: Deltares.
- van Eyden, W., & Schuurmans, R. (1971). *Geo-hydrologisch onderzoek Spijkse Dijk*. Rijkswaterstaat Deltadienst, december 1971.
- WSRL. (2014). *Technische nota - randvoorwaarden en uitgangspunten SLa*. Rapport, maart 2014.
- Zwanenburg, C., van Duinen, A., & Rozing, A. (2013). *Technisch Rapport Macrostabiliteit*. Deltares, Rapport, 1204203-007, Concept, 20 februari 2013, 136 bladzijden.



Symbolenlijst

symbool	uitleg
γ_n	partiële factor: houdt verband met normhoogte, het al dan niet falen door hoogwater en het lengte-effect (schadefactor) (-)
γ_d	partiële factor: modelonzekerheid (modelfactor) (-)
γ_m	partiële factor: onzekerheid in materiaaleigenschappen (materiaalfactor) (-)
γ_b	partiële factor: onzekerheid in ondergrondopbouw en water(over)spanningen (schematiseringfactor) (-)
$\gamma_{u,m}$	veiligheidsfactor voor opbarsten in relatie tot macrostabiliteit
$\gamma_{u,p}$	veiligheidsfactor voor opbarsten in relatie tot piping
$\gamma_{b-u,p}$	partiële veiligheidsfactor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het mechanisme opbarsten in relatie tot piping (de schematiseringsfactor)
γ_{he}	veiligheidsfactor voor heave
γ_{b-h}	partiële veiligheidsfactor voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het mechanisme heave. (de schematiseringsfactor)
$P_{eis,dsn}$	faalkanseis per doorsnede en per faalmechanisme (1/jaar)
P_{max}	maximaal toelaatbare overstromingskans (1/jaar)
ω	Bijdrage faalmechanisme aan faalkansbegroting (-)
N	Lengte effect van het betreffende dijktraject voor het betreffende faalmechanisme (-)
$L_{traject}$	lengte van het dijktraject waarop de norm van toepassing is (m)
a	Fractie van lengte dijktraject dat gevoelig is voor betreffende faalmechanisme (-)
b	lengte van onafhankelijk equivalente vakken voor het betreffende faalmechanisme (m)
FS	stabiliteitsfactor (-)
β	betrouwbaarheidsindex (-)
k_h	horizontale waterdoorlatendheid (m/dag)
k_v	verticale waterdoorlatendheid (m/dag)
kD	doorlaatvermogen (m ² /dag)
c	weerstand (dag)
λ	spreidingslengte (m)
s	waterstand boven referentieniveau (m)
s_0	waterstand in de rivier boven referentieniveau (m)
x	afstand van de rivier (m)
v	stroomsnelheid (m/dag)
q	debiet (m ³ /dag)
i	verhang (m/m)
l	lengte (m)
a	lengte (m)
b	breedte (m)
Q	Injectie- of onttrekkingsdebiet, of kweldebiet naar achterland (m ³ /dag)
K_0	Besselfunctie, orde nul
v	poriewatersnelheid (m/dag)
D	dikte van watervoerende laag (m)
x	lengte langs de waterkering (m)
y	lengte loodrecht op de waterkering (m)
$\varphi_b(x,y)$	de stijghoogte in het watervoerende pakket (m)
$h(x,y)$	de freatische grondwaterstand in de deklaag (m)



symbool	uitleg
L_{dijk}	in de watervoerende laag onder de dijk in de watervoerende laag onder de dijk (m/m)
kD	doorlaatvermogen watervoerende laag onder de dijk (m^2/dag)
$L_{traject}$	lengte van het traject waarover het kweldebiet moet worden berekend (m)
Q_d	het feitelijke waterbezwaar onttrokken door het drainagesysteem (m^3/dag)
Q_w	het additionele waterbezwaar (m^3/dag)
Q_0	het waterbezwaar voor de uitgangssituatie (m^3/dag)
u	waterspanning in een kleilaag ()
c_v	consolidatiecoëfficiënt (m^2/dag)
ρ_w	soortelijk gewicht van water (kg/m^3)
g	zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
m_v	samendrukbaarheid grond (m^2/N)
n	porositeit (-)
β_w	samendrukbaarheid van water (m^2/N)
S	bergingscoëfficiënt (-)
S_s	specifieke bergingscoëfficiënt ($1/m$)
D	laagdikte (m)
L'	indringingslengte (m)



Begrippenlijst

De begrippen die gehanteerd worden in dit Technisch Rapport zijn ontleend aan de begrippen zoals die gehanteerd worden binnen het WBI (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017a).

Begrip	Omschrijving
afdeklaag	Ondoorlatende of slecht doorlatende laag op het zandpakket aan de binnendijkse zijde, bestaande uit klei of veen.
aquifer	Watervoerend pakket. Grondlagen waarbinnen de relatief (ten opzichte van de omgeving) hoge doorlatendheid aanzienlijk transport van grondwater mogelijk maakt.
basisveiligheid	Minimale veiligheid tegen overstromingen voor iedereen achter de dijk.
beheer	Geheel van activiteiten dat noodzakelijk is om te waarborgen dat de functies van de waterkering blijven voldoen aan de daarvoor vastgestelde eisen en normen
beheerder	Zie waterkering beheerder
belasting	Op een constructie (een waterkering) uitgeoefende in- en uitwendige krachten, ofwel de mate waarin een constructie door in- en uitwendige krachten wordt aangesproken, uitgedrukt in een fysische grootheid.
benedenrivierengebied	Rivierengebied ten westen van de lijn Schoonhoven –Werkendam – Dongemond, inclusief Hollands Diep en Haringvliet, maar zonder de Hollandsche IJssel. De combinatie van waterstanden op zee en rivierafvoeren veroorzaakt in dit gebied de hoge waterstanden.
berm	Extra verbreding aan de binnendijkse of buitendijkse zijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden, zandmeevoerende wellen te voorkomen en de golfslag en /of golfoverslag te reduceren.
betrouwbaarheidsindex	Waarde die de mate van 'betrouwbaarheid' van een waterkering weergeeft. Een hoge betrouwbaarheid correspondeert met een kleine faalkans.
bezwijken	Het optreden van verlies van inwendig evenwicht (bijvoorbeeld afschuiven) en/of het optreden van verlies van samenhang in materiaal (bijvoorbeeld het verweken) en/of het optreden van ontoelaatbaar grote vervormingen van de waterkering.
binnenberm	Extra verbreding aan de landzijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden en/of om zandmeevoerende wellen te voorkomen.
binnendijks	Aan de kant van het land of het binnenwater.
binnentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de binnendijkse zijde van de dijk.
binnenteen	De onderrand van het dijklichaam aan de landzijde van de dijk (de overgang van dijk naar maaiveld).
bodemligging	Positie van de bodem ten opzichte van een referentievlak, dikwijls NAP.
bovenrivierengebied	Het door Rijn en Maas gevoede rivierengebied ten oosten van de lijn Schoonhoven - Werkendam – Dongemond. Hoge rivierafvoer veroorzaakt de hoge waterstanden in dit gebied.
buitendijks	Aan de kant van het te keren (buiten)water.
buitentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de kerende zijde.
buitenteen	Onderrand van het dijklichaam aan de buitendijkse zijde van de dijk (de overgang van dijk naar maaiveld en /of voorland).



Begrip	Omschrijving
cohesieve laag	Zie afdeklaag.
deterministisch	Hiermee wordt bedoeld dat tijdens het toetsen een parameter niet als stochast wordt gemodelleerd. De waarde van deze parameter wordt als "bekend" verondersteld.
deterministisch model	Een model dat de invoer volgens een vaststaande wetmatigheid omzet in uitvoer, zonder rekening te houden met onzekerheden.
dijk	Waterkerend grondlichaam.
dijkbasis	De zich binnen de invloedssfeer van de dijk bevindende ondergrond.
dijktraject	Gedeelte van een primaire waterkering dat afzonderlijk genormeerd is. Een dijktraject kan bestaan uit duinen, dijken en/of dammen en eventuele kunstwerken.
dijkvak	Een deel van een waterkering met uniforme eigenschappen en belasting. Zie ook vak.
doorlatendheid	Het vermogen van de grond om vloeistof door te laten. Verhouding tussen specifiek debiet en verhang. Darcy doorlatendheid, afhankelijk van de viscositeit van het water.
eenheid / eenheden van WBI-SOS)	WBI-SOS verdeelt de ondergrond in eenheden, in totaal 43 (Bijlage B). Een WBI-SOS eenheid bestaat uit een grondlaag of grondlagen die relatief homogeen verdeelde eigenschappen hebben. De lithologie kan homogeen zijn, maar het is ook mogelijk dat de eenheid een homogene afwisseling bevat van verschillende lithologieën, bijvoorbeeld zand/klei afwisselingen. De eenheden zijn zo opgezet en beschreven dat ze herkend kunnen worden in boringen en sonderingen en dat ze relatief eenvoudig zijn te koppelen aan proevenverzamelingen.
economische schade	De schade die opgelopen is door ontvricting van economische processen.
faalkans	In het algemeen de kans op falen, in dit geval van een kering of een onderdeel daarvan. Bij een voorliggende kering: kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor de hydraulische belasting op een achterliggend dijktraject substantieel wordt verhoogd.
faalkansbegroting	Verdeling van de toegestane faalkans over de faalmechanismen. Wordt toegepast in de gedetailleerde toets per vak, waarbij een faalkansbegroting wordt voorgeschreven. In de gedetailleerde toets per traject wordt de faalkansbegroting vrijgelaten.
faalmechanisme	De opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot falen.
falen	Falen van een technisch systeem of onderdeel ervan houdt in dat het zich bevindt in een toestand waarbij een of meer functies daadwerkelijk niet meer (kunnen) worden vervuld. In de beoordeling van de veiligheid van de primaire waterkeringen is dat de waterkerende functie.
freatische lijn	Niveau van de grondwaterspiegel in een dijklichaam
foutenboom	Schematische weergave van combinaties van oorzaken die tot bepaalde ongewenste gebeurtenissen, topgebeurtenissen genoemd, aanleiding kunnen geven.
gemiddeld hoogwater	De gemiddelde hoogte van hoogwater op een locatie over een periode van 19 jaar (in een getijdegebied).
geotechnisch profiel	De verticale opbouw in grondmechanische zin van een waterkering.
glijvlak	Het vlak waarlangs een afschuivende grondmoot afschuift over het stabiele deel van een grondlichaam en waarlangs door de grond



Begrip	Omschrijving
	schuifsterkte wordt gemobiliseerd.
glijvlak model	Rekenmodel waarmee de weerstand van een grondmoot tegen afschuiven langs een schuifvlak wordt berekend.
golfcondities	Weergave van de toestand van een golfveld op een bepaald moment, veelal in termen van significante golfhoogte, (gemiddelde of piek)periode en gemiddelde golfrichting.
golfhoogte	De verticale afstand tussen dal en top van een golf.
grenslaag	Onderste deel van het afdekkende pakket. Bij hoogwater wordt de waterspanning in de grenslaag beïnvloed door de stijghoogte in de onderliggende aquifer.
grenspotentiaal	Stijghoogte in de aquifer die in evenwicht is met het gewicht van het afdekkende pakket.
grenstoestand	Toestand waarin de sterkte van een constructie of een onderdeel daarvan nog juist evenwicht maakt met de daarop werkende belastingen.
grondwaterstand	Hoogteligging van het freatisch vlak
heave	Situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming; ook fluidisatie of de vorming van drijfzand genoemd.
heterogeen	Van punt tot punt belangrijke verschillen in eigenschappen bezittend.
hydraulisch belastingniveau	De kruinhoogte waarbij de kans op het overschrijden van een kritiek golfoverslagdebiet met een kans van voorkomen die getalsmatig gelijk is aan de norm van het dijktraject waar de waterkering onderdeel van uitmaakt
hydraulische belasting	Belasting op de waterkering als gevolg van de lokale waterstand en bijbehorende golven.
hydraulische condities	De condities die bepalend zijn voor de hydraulische belasting. Het betreft onder meer waterstanden, stroming, golfhoogten en golflengten.
hydraulische waterspanning	(Grond)waterspanning in een punt in de (onder)grond die overeenkomt met de waterspanning als gevolg van een kolom water vanaf dat punt tot aan de vrije grondwaterspiegel.
hydraulische weerstand	Karakterisering van de doorlatendheid van grondlagen. Weerstand die een bepaalde laag biedt tegen (meestal verticale) grondwaterstroming. Bij een homogene laag is deze grootheid gelijk te stellen aan het quotiënt van laagdikte D en (verticale) doorlaatcoëfficiënt k .
hydrostatische waterspanning	(Grond-)waterspanning in een punt in de (onder-)grond die overeenkomt met de waterspanning als gevolg van een kolom water vanaf dat punt tot aan de vrije grondwaterspiegel.
infiltratie	Indringen van water in de dijk of ondergrond.
intreepunt	(Theoretisch) punt waar het buitenwater tot de aquifer toetreedt, als gevolg van het verval over de waterkering.
intreeweerstand	Weerstand veroorzaakt door een slecht-doorlatend sliblaagje ter plaatse van het intreepunt.
kruin	1. Strook tussen buitenkruinlijn en binnenkruinlijn; 2. Hoogste punt in het dwarsprofiel van het dijklichaam; 3. Buitenkruinlijn.
kruinhoogte	Hoogte van de waterkering.
kwel	Het uittreden van grondwater (water dat door of onderdoor een waterkering stroomt) als gevolg van het te keren verval over de waterkering (waterstandsverschil). Doorsijpelen van water onder de



Begrip	Omschrijving
	dijk door. In het algemeen: het diffuus uittreden van grondwater. In het bijzonder: het uittreden van grondwater onder invloed van grotere stijghoogten elders in het hydrologische systeem.
kwelweg	Mogelijk pad in de grond dat het kwelwater aflegt, van het intreepunt naar het uittreepunt.
kwelweglengte	Lengte van de kwelweg, dit is de afstand die het kwelwater ondergronds aflegt voordat het weer aan de oppervlakte komt.
langsstroming	Stroming van water over het talud evenwijdig aan de as van de dijk.
lengte-effect	Invloed van variaties van dijk- en ondergrondeigenschappen binnen een dijktraject op de faalkans van (een faalspoor binnen) dat dijktraject, wiskundig gezien gelijk is aan de verhouding tussen de faalkans van een "uniform" dijksegment en de faalkans van een dwarsdoornede uit datzelfde segment.
life cycle analysis	Beschouwing over één of meer aspecten van een product, proces, et cetera, waarbij de gehele levenscyclus van het onderzochte in de beschouwing voorkomt.
maatgevende hoogwaterstand	De waterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de normfrequentie van het dijktraject waar de waterkering onderdeel van uitmaakt.
maatgevende waterstand	Waterstandsniveau waarbij de bekleding volgens de berekening zal bezwijken.
macro-instabiliteit	Het afschuiven van grote delen van het grondlichaam van een dijk langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel het evenwichtsverlies ten gevolge van het ontstaan van grote plastische zones.
macrostabiliteit	Weerstand tegen het optreden van een glijvlak in het talud en de ondergrond
materiaalfactoren	Partiële factoren, die op de karakteristieke materiaalparameters worden toegepast om onzekerheden in de grondeigenschappen te verdisconteren.
modelfactor	Partiële factor waarin onzekerheden in de berekeningsmethodes zijn verdisconteerd
norm	Wettelijk vastgestelde eis aan de overstromingskans van een dijktraject
normfrequentie	Nog net toelaatbare overstromingskans van een dijktraject.
normtraject	Waterkeringtraject of (in juridische termen) dijktraject waarvoor in de Waterwet een faalkanseis is gegeven (ook traject).
numeriek model	Model dat door middel van discretisatie de differentiaalvergelijkingen oplost, die de fysische processen beschrijven
ondergrondmodel	Een ondergrondmodel geeft de ruimtelijke verdeling van geologische, geotechnische of hydrologische eenheden in de ondergrond, vaak in 3D
ondergrondscenario	De stapelingen van WTI-SOS eenheden die binnen segmenten kunnen voorkomen worden scenario's of WTI-SOS scenario's genoemd. Vanwege de onzekerheid over de werkelijke grondopbouw op elke locatie langs de dijk worden er meestal meerdere scenario's vastgesteld en wordt voor elk van die scenario's de kans van aantreffen gegeven. De WTI-SOS scenario's worden tijdens het toetsen lokaal verfijnd tot lokale scenario's.
ondergrondschematisatie	Een schematische weergave van (een deel) van de ondergrond voor een bepaald gebied.
opbarsten	Scheuren (bezwijken) van de binnendijks gelegen afdekkende laag



Begrip	Omschrijving
opdrijven	die is opgedreven als gevolg van een te grote wateroverspanning in de daaronder gelegen watervoerende laag. Algemeen: Bezwijken van de grond door het ontbreken van verticaal evenwicht in de grond, onder invloed van wateroverdrukken. Vorm van hydraulische grondbreuk waarbij een cohesieve afdekkende laag wordt opgelicht ten gevolge van wateroverspanning in de onderliggende watervoerende laag. Opdrukken van het afdekkende pakket door het bereiken van de grenspotentiaal.
overloop	Het verschijnsel waarbij water over de (kruin van de) waterkering het achterland in loopt, omdat de waterstand in het buitenwater (rivier, zee, meer) hoger is dan de waterkering.
overloopdebiet	De hoeveelheid water die door overloop per strekkende meter gemiddeld per tijdseenheid over de waterkering loopt.
overlopen	Het over de waterkering heen stromen van water, als de waterstand hoger is dan de waterkering.
overslagdebiet	Volume water dat per strekkende meter per seconde door de golfbeweging over de buitenkruinlijn slaat.
overstroming	de situatie dat er dusdanig veel water in het gebied achter de (primaire) kering komt te staan dat dodelijke slachtoffers vallen of substantiële economische schade ontstaat.
overstromingskans	Kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt dat dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade ontstaat.
overstromingskans-benadering	Veiligheidsbeoordeling op basis van overstromingskansen, die tot uitdrukking worden gebracht in de kans dat de belasting van een dijktraject groter is dan de sterkte.
overstromingskansnorm	De normspecificatie geldend voor een dijktraject.
partiële (veiligheids)factor	Vermenigvuldigingsfactor die (mits >1 en voor een parameter die bijdraagt aan de sterkte) resulteert in een strengere betrouwbaarheidseis
partiële factor	Factor waarmee een representatieve waarde vermenigvuldigd (of gedeeld) wordt ter verkrijging van de rekenwaarde. De partiële factoren dienen om onzekerheden in belastingen, materiaaleigenschappen, rekenmethodes, gevolgen van falen en de overschrijdingskans van grenstoestanden in rekening te brengen
peil	De hoogte van de waterstand.
peildatum	Datum, vastgesteld door de Minister van Infrastructuur en Milieu, waarop de toetsing van de primaire waterkering betrekking heeft. De (verwachte) toestand op de peildatum wordt getoetst.
piping	Het verschijnsel dat onder een waterkering (dijk of kunstwerk) holle pijpvormige ruimtes ontstaan, ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd; dit verschijnsel wordt ook onderloopsheid genoemd. In de feitelijke definitie is sprake van piping indien zich een doorgaand open kanaal heeft gevormd van intreepunt tot uitreepunt doordat het erosieproces van een zandmeevoerende wel niet stopt
polderpeil	Peil van het oppervlaktewater binnen een beheersgebied
potentiaal	Stijghoogte ten opzichte van een referentievlak
porositeit	Verhouding tussen de open ruimte tussen de korrels en het totale volume (open ruimte + korrels) van het granulaire materiaal
probabilistische analyse /	Analyse waarin de faalkans van een waterkering wordt bepaald,



Begrip	Omschrijving
faalkansberekening	rekening houdend met alle relevante onzekerheden (natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheden).
probabilistische beoordeling	Beoordeling of een waterkering voldoet, op basis van een probabilistische analyse.
proevenverzameling	Verzameling/steekproef van in het terrein gemeten of in het laboratorium bepaalde waarden van grondeigenschappen, ingedeeld naar geologische/geotechnische formatie.
ruimtelijke correlatie	Mate van samenhang tussen de waarde van een variabele op locatie x en de waarde van diezelfde variabele op naburige locaties.
ruimtelijke variabiliteit	Variatie van een stochastische variabele over een waterkering, in dwarsrichting en/of lengterichting.
scenario	Een beschrijving van een keten van gebeurtenissen die leidt tot de ongewenste gebeurtenis (falen van de waterkeringen in een dijktraject. In de beoordeling kunnen alle onzekerheden die niet als nette/continue kansverdeling zijn weer te geven, in de beoordeling als scenario's worden weergegeven, daarbij kan gedacht worden aan onzekerheden in ondergrond en dijkopbouw, de al dan niet daaraan gerelateerde waterspanningen of situaties met falen van NWO's en/of al dan niet aangetaste voorlanden en havendammen.
schadefactor	Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade, die in rekening brengt in welke mate de vereiste betrouwbaarheid afwijkt van het basisbetrouwbaarheidsniveau.
schematisch ondergrondmodel	De stratigrafie (gelaagdheid) waarop het (ondergrond)model is gebaseerd.
schematisering	Vereenvoudigde voorstelling van de ruimtelijke en temporele verdeling van systeemvariabelen en parameters.
schematiseringshandleiding	Handleiding waarin voor één of meer toetssporen staat hoe de relevante aspecten van een kering geschematiseerd moeten worden om deze te kunnen beoordelen.
schuifsterkte	De sterkte die de grond kan mobiliseren langs het (potentiële) schuifvlak.
segment	Bij het opstellen van WBI-SOS (zie WBI-SOS) zijn de dijken opgedeeld in segmenten. Aan elk segment zijn scenario's van een mogelijke grondopbouw toegekend.
semi-probabilistische analyse	Analyse of de kering voldoet aan een gestelde betrouwbaarheidseis op basis van karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren.
semi-probabilistische beoordeling	Toetsing op basis van een semi-probabilistische analyse.
spreidingslengte	De wortel uit het product van het doorlaatvermogen kD van een watervoerend pakket en de hydraulische weerstand c van de onder- of bovenliggende slecht doorlatende laag.
stabiliteitsfactor	De verhouding tussen sterkte en belasting (veelal in een stabiliteitsberekening van een waterkering).
stabiliteitsnorm	De minimale waarde van de stabiliteitsfactor, waaraan een waterkering moet voldoen.
stijghoogte	Niveau tot waar het water zou stijgen in een peilbuis met filter ter plaatse van het punt; wordt uitgedrukt in meters waterkolom ten opzichte van een referentievlak.
stochast / stochastische variabele	Variabele die een onzeker proces beschrijft.
stochastische ondergrond (schematisatie)	Met stochastisch wordt bedoeld dat een bepaald aspect, bij WBI-SOS de opbouw van de ondergrond, variabel is. Deze variabiliteit wordt bij



Begrip	Omschrijving
	WBI-SOS gevat in verschillende scenario's met kansen van aantreffen.
terugslagklep	Een onder invloed van zwaartekracht (en waterdruk) sluitende waterkerende klep, waarmee een watervoerend element kan worden afgesloten (wat terugstromen van water voorkomt).
transmissiviteit	Het gemak waarmee water door een granulaire laag kan stromen, gelijk aan het product van de waterdoorlatendheid en de laagdikte.
uittreepunt	Locatie aan de landzijde waar kwelwater het eerst aan het oppervlak treedt.
uittreeverhang	Verhang in het grondwater ter plaatse van het uittreepunt.
uittreeweerstand	Weerstand veroorzaakt door een slecht-doorlatend laagje ter plaatse van het uittreepunt.
uitvoerlocatie vak	Locatie waarvoor de hydraulische belastingen worden gegeven. Een vak is een gedeelte van een dijktraject waarvoor (gegeven een toetsspoor) de sterkte- en belastingeigenschappen min of meer uniform zijn. Een vak kan een dijk zijn, maar ook een dam, een kunstwerk, of een duin.
veiligheidsfactor	Zie partiële veiligheidsfactor.
veiligheidsmarge	De mate waarin extra veiligheid aanwezig is.
verhang	Verhouding tussen het verschil in stijghoogte tussen twee punten en de afstand tussen die punten; wordt ook gradiënt genoemd.
verhanglijn	De waterspiegel volgens de stroomrichting in een waterloop bij een bepaalde afvoer of onder bepaalde omstandigheden.
verzadigde doorlatendheid	Doorlatendheid van verzadigde grond (m/s).
voorland	Buitendijks terrein tussen de dijk en de rivier, of ondiepe waterbodem voor de teen van de dijk.
vooroever	Waterbodem in de zone voor de teen van een dijk, tot aan het diepste punt van de geul.
waterkering beheerder	Krachtens de Waterwet aangewezen verantwoordelijke voor het beheren van de (primaire) waterkeringen.
WBI-SOS	Stochastische Ondergrond Schematisering
zeespiegelstijging	De stijging van de gemiddelde zeestand ten opzichte van NAP.
zetting	Verticale verplaatsing als gevolg van volumeverkleining van samendrukbare lagen in de ondergrond, hoofdzakelijk ten gevolge van een bovenbelasting, de eigen massa en/of het uittreden van water.
zorgplicht	De wettelijke taak van de beheerder om de primaire kering aan de veiligheidseisen te laten voldoen en voor het noodzakelijke preventieve beheer en onderhoud te zorgen.



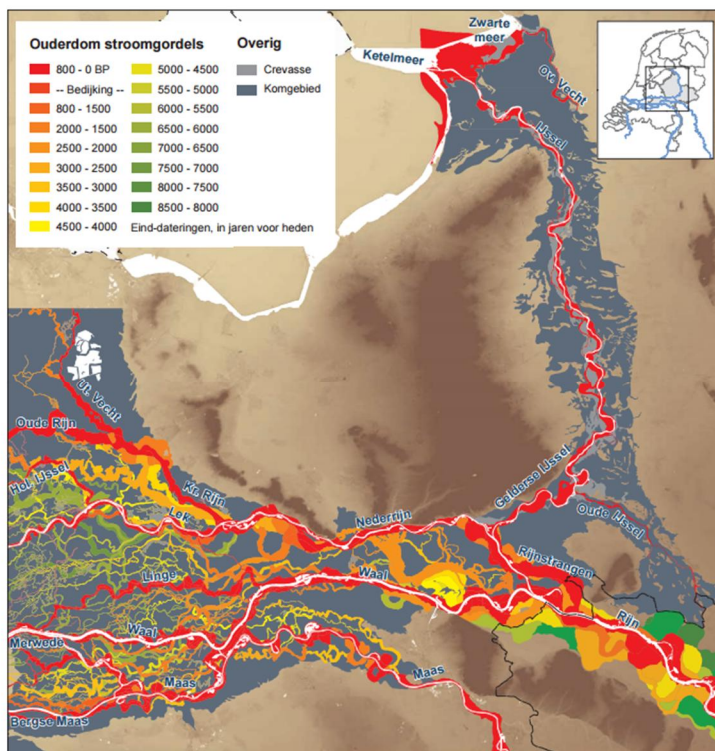
A Ondergrondgegevens

Topografie

Op gedetailleerd topografisch kaartmateriaal zijn waterhuishoudkundige elementen goed herkenbaar. Dit betreft bijvoorbeeld of in het modelgebied zomerdijken voorkomen en welke hoogte die hebben. Waterschap kunnen informatie verstrekken, bij welke rivierstand de inlaatdrempel wordt overschreden en de uiterwaarden overstroomd worden. Als in de uiterwaard sloten of nevengeulen voorkomen, moet worden nagegaan hoe diep die zijn en of deze een mogelijk aanwezig kleidek doorsnijden.

Het profiel en de hoogteligging van de (winter)dijk kan globaal uit kaartmateriaal worden afgelezen maar volgt in meer detail uit de legger en geactualiseerde meetdata van het waterschap. Voor de binnendijkse zijde kan uit de topografie worden afgeleid of polders voorkomen. Topografische informatie betreft dan vooral de omvang en hoogteligging van de polders. De maaiveldhoogte is tevens te vinden op digitale hoogtekaarten zoals van het actueel hoogtebestand Nederland, AHN. Uit leggerinformatie van het waterschap zijn de gegevens en beheerste peilen van de watergangen af te leiden.

Door manipulatie van hoogtedata uit het AHN kan men aan de hand van een variërende maaiveldhoogte afleiden of in het gebied oude geulafzettingen voorkomen. Waar dit optreedt, kan sprake zijn van ondiepe zandvoorkomens die een kleidek doorsnijden. Dergelijke zandbanen zijn gekarteerd door de Universiteit van Utrecht (Cohen, Stouthamer, Hoek, Berendsen, & Kempen, 2009). Vooral bij detaillering van schematisaties en bij de formulering van de benodigde onderzoeksinspanning is dergelijke informatie onmisbaar.



Figuur A.1 Ouderdom van stroomgordels en verbreiding van komafzettingen in de Rijn-Maas delta (Zand in banen, Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel, K.M. Cohen, E. Stouthamer, W.Z. Hoek, H.J.A. Berendsen † & H.F.J. Kempen, 3^e druk, 2009)

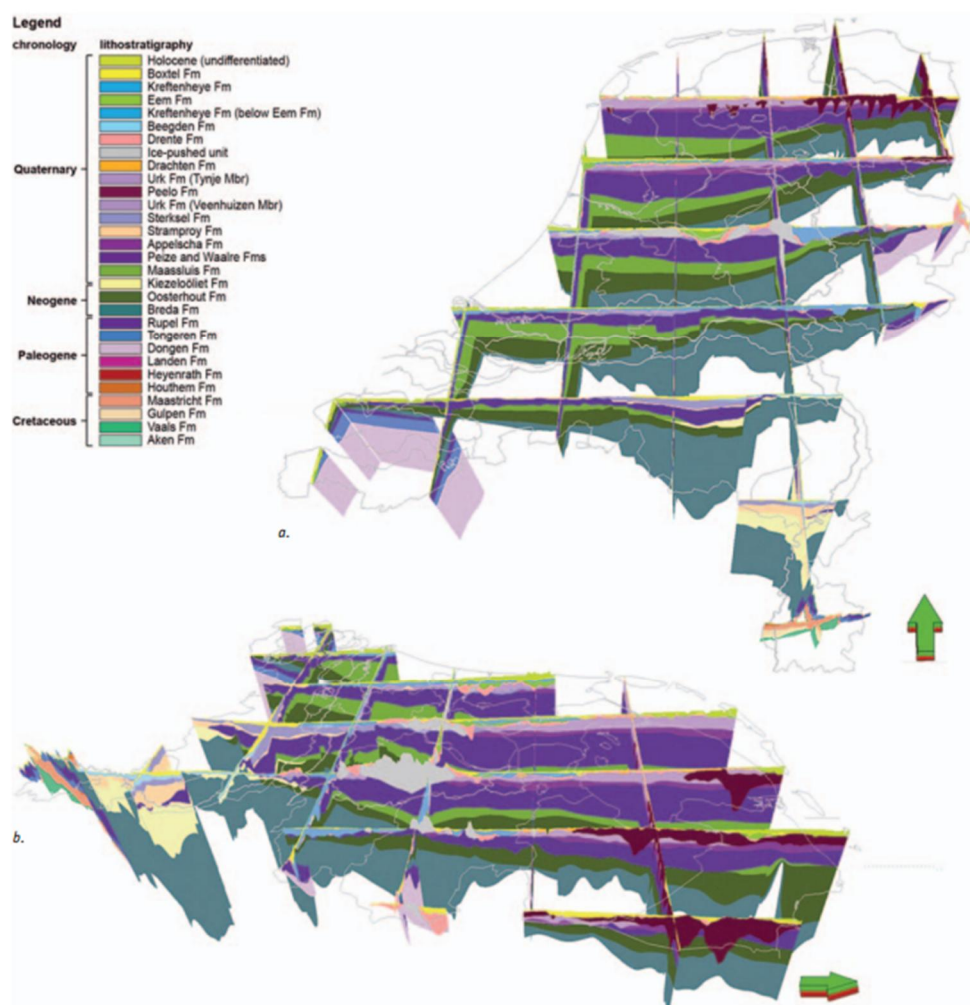
Ondergrondmodellen

DINOloket is opgezet door de Geologische Dienst Nederland – TNO. DINOloket bevat de data en schematisaties die gemaakt zijn in het kader van de studies naar diverse ondergrondmodellen. Deze ondergrondmodellen zijn DGM (Digitaal Geologisch Model), REGIS (het Hydrogeologisch model) en GEOTOP. De DINO database die ten grondslag ligt aan de bodemmodellen is aangemaakt met honderdduizenden boringen en sonderingen. De ondergrondmodellen voorspellen op basis van de gegevens en geologische kennis het voorkomen van diverse grondsoorten. Algemene beschrijvingen van de modellen zijn te vinden op www.dinoloket.nl.

Met betrekking tot de grondwaterkwaliteit zijn in DINOloket eveneens data verzameld.

Digitaal Geologisch Model DGM

In DGM zijn de bodemlagen ingedeeld in geologische of lithostratigrafische eenheden. Deze indeling is gebaseerd op verschillen in lithologie en andere eigenschappen in boorgegevens. Uit de nationale database is daartoe een beperkte selectie gemaakt van goed beschreven boringen (circa 25000 boorpunten). Het DGM is een model van de opbouw en de samenhang (geometrie) van deze lithostratigrafische eenheden.



Figuur A.2 Doorsneden uit DGM met aanduiding van lithostratigrafische eenheden (Gunnink, Maljers, Gessel, Menkovic, & Hummelman, 2013)

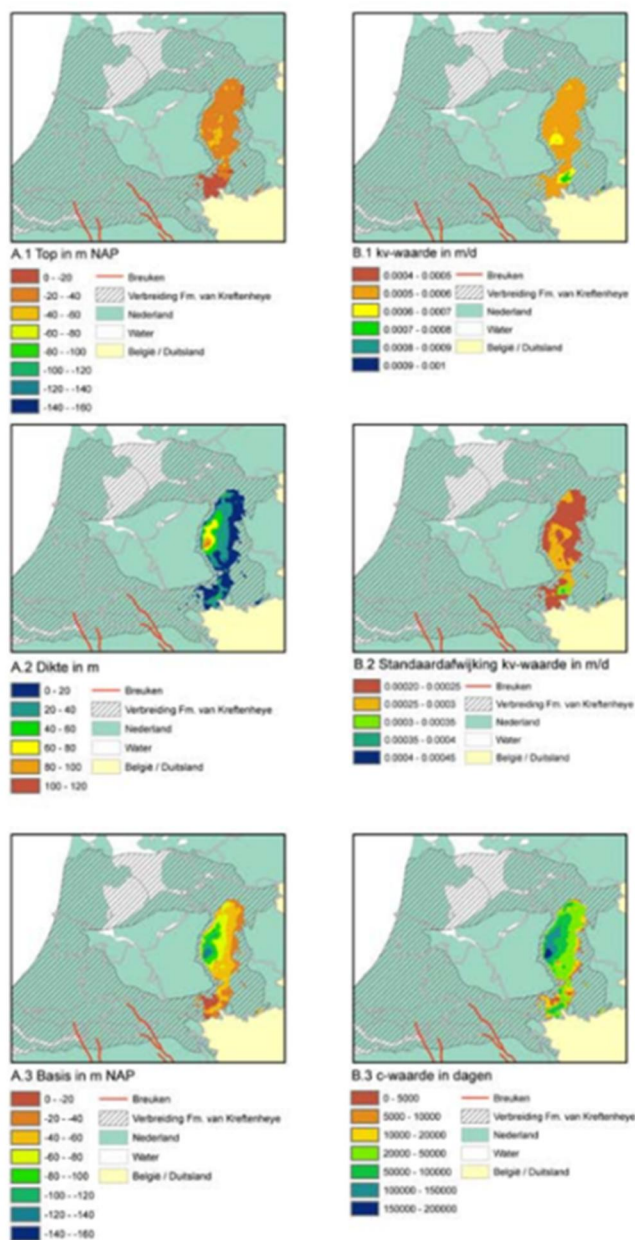
Het model geeft informatie over de top, basis en dikte van 31 onderscheiden eenheden. Bedenk bij het gebruik van kaartmateriaal dat het DGM een regionaal model is. In het lagenmodel wordt een voorspelling gegeven van de opbouw van de ondergrond die representatief is voor een gebied van 100 bij 100 m. DGM bevat op punten interpretaties waarover bij de geologen nog twijfel bestaat. Deze punten zijn relevant bij het gebruik van het DGM en zijn om die reden aangeduid als “aandachtspunten”. DGM is daarom niet geschikt voor gebruik op lokale schaal; voor het genereren van een lokaal ondergrondmodel zullen altijd aanvullende gegevens nodig zijn. Door de inwinning van nieuwe informatie uit boringen, sonderingen of bijvoorbeeld seismiek, veranderen de inzichten in regionaal-geologische processen en in de methoden om te komen tot parameters. Bovendien is de interpretatie van de opbouw en de modellering van de eigenschappen van de ondergrond een dynamisch proces.

REGIS

REGIS II wordt voor het Nederlands grondwaterbeheer bij het maken van geohydrologische modellen als standaard gezien voor het verkrijgen van een conceptueel inzicht in de hydro-geologische opbouw en de karakterisatie van de ondergrond. REGIS II vormt in veel



hydrologisch onderzoek de basis voor de schematisatie ten behoeve van grondwatermodellering.



Figuur A.3 Voorbeeld van kaartbestanden uit REGIS II van de geometrie (A) en geohydrologische eigenschappen (B) van eenheid KRTW-k-1, Krefteheide-Twello Klei 1 [flyer REGIS II, TNO 2009]

Het landsdekkend model REGIS is opgezet op dezelfde beperkte set boorgegevens als DGM. In REGIS-II, de opvolger van het Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem REGIS-I, zijn 131 zandige, kleiige, complexe (afwisselend zand-klei), venige, bruinkool- en kalksteeneenheden in kaart gebracht. De eenheden kunnen op regionale schaal onderscheiden worden binnen de afzonderlijke geologische formaties van DGM. Tijdens de kartering is, naast de boorinformatie, ook kennis over de sedimentatie- en erosieprocessen ingebracht zodat meer inzicht is verkregen over de aard van de sedimenten. Daarmee is een goede basis gevonden voor een hydrogeologische onderverdeling via de lithologische

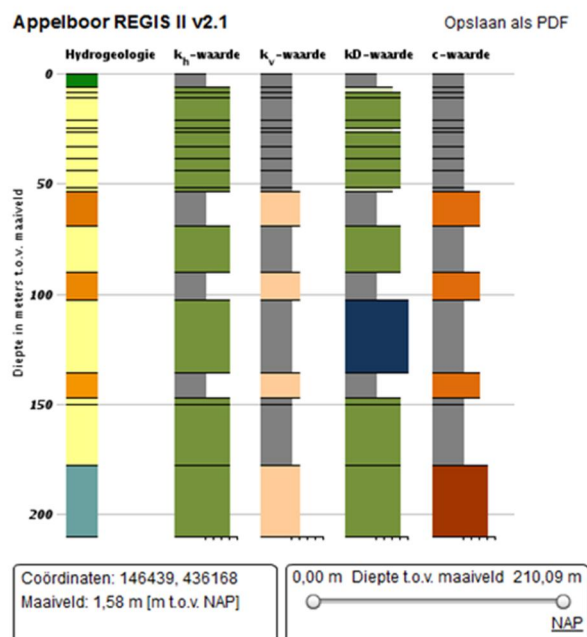


samenstelling en de daarmee samenhangende geohydrologische eigenschappen (TNO, REGIS-II, 2016).

Op basis van de doorlatendheid van de lithologische eenheden zijn goed doorlatende en slecht doorlatende lagen te onderscheiden. Deze lagen worden in REGIS-II hydrogeologische eenheden genoemd. Deze eenheden zijn gemodelleerd als lagen met min of meer uniforme eigenschappen en zijn onderdeel van de in DGM aangehouden geologische of lithostratigrafische eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant, en de dikte van de eenheden zijn vastgelegd in gridbestanden met een celgrootte van 100 bij 100 meter.

Naast de geometrische gegevens bevat het model voor elke eenheid gegevens over de doorlatendheid maar ook over de onzekerheid rondom deze parameters in de vorm van de standaardafwijking. Het model vormt daarmee de basis voor het maken van schematisaties van de ondergrond, in het bijzonder ten behoeve van landelijke en regionale grondwatermodellen.

Via REGIS is het niet alleen mogelijk om van de boringen geïnterpreteerde hydrogeologische modeleenheden, de lithoklasse-intervallen, de verticale opeenvolging van boorbeschrijvingsintervallen te vinden, maar ook informatie over de horizontale en verticale doorlatendheidsklassen van de hydro-geologische modeleenheden. Het is bovendien mogelijk om per coördinaat informatie op te vragen in kolommen ten opzichte van het maaiveld met inzicht in diepteligging, de dikte en de hydraulische eigenschappen van deze eenheden, te weten de horizontale doorlatendheid (k_h), de verticale doorlatendheid (k_v), de transmissiviteit (kD) en de verticale weerstand (c). De REGIS-II gegevens zijn als GIS-bestanden per 1:25.000 kaartblad, of uitsnede per provincie of waterschapsgebied te downloaden van de DINO website.



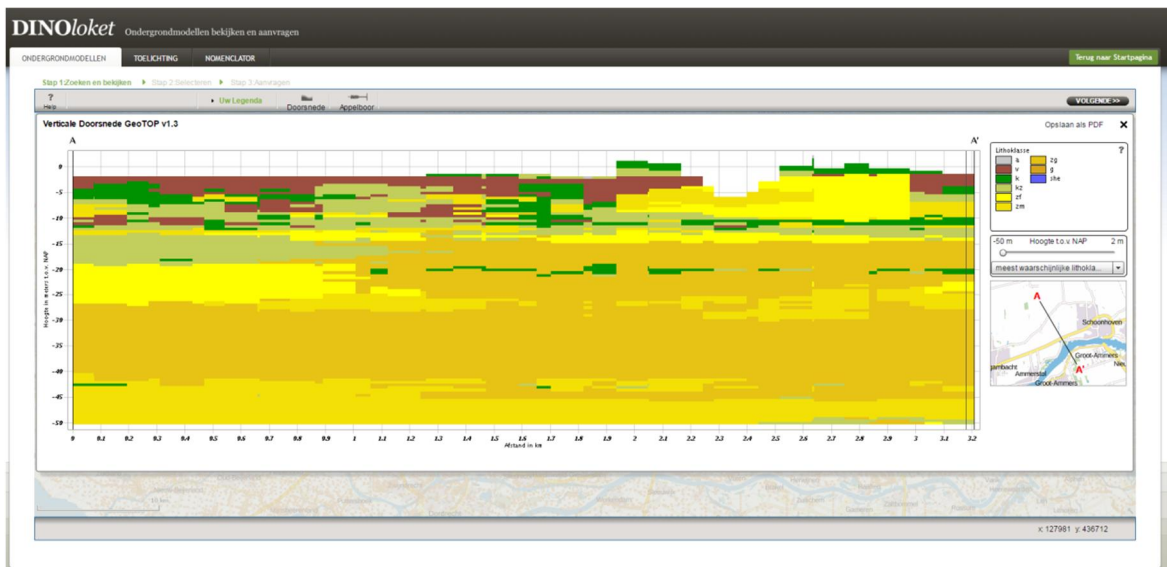
Figuur A.4 Voorbeeld van een visualisatie van REGIS-II

GeoTOP

Bij vraagstukken over de ondergrond die zich op een grotere schaal afspelen, kan GeoTOP dienen als basis om meer detail in een geohydrologisch model in te brengen. In het model GeoTOP is op basis van een groot deel van de honderdduizenden boringen en sonderingen uit de



landelijke DINO-database een gedetailleerd driedimensionaal beeld van de ondergrond van Nederland opgebouwd tot een diepte van maximaal 50 meter onder NAP. In GeoTOP is de ondergrond opgedeeld in zogenaamde voxels (cellen) van 100 bij 100 meter horizontaal en 50 centimeter verticaal. Aan elke voxel zijn eigenschappen gekoppeld, zoals lithostratigrafische eenheid en grondsoort met korrelgrootte aanduiding (lithoklasse).



Figuur A.5 Voorbeeld van een ondergrondprofiel uit GeoTOP voor de meest waarschijnlijke lithoklasse in een doorsnede nabij Schoonhoven (TNO, GeoTOP, 2016)



Figuur A.6 Kaart met dekingsgebied door GeoTOP in 2016 (TNO, GeoTOP, 2016)



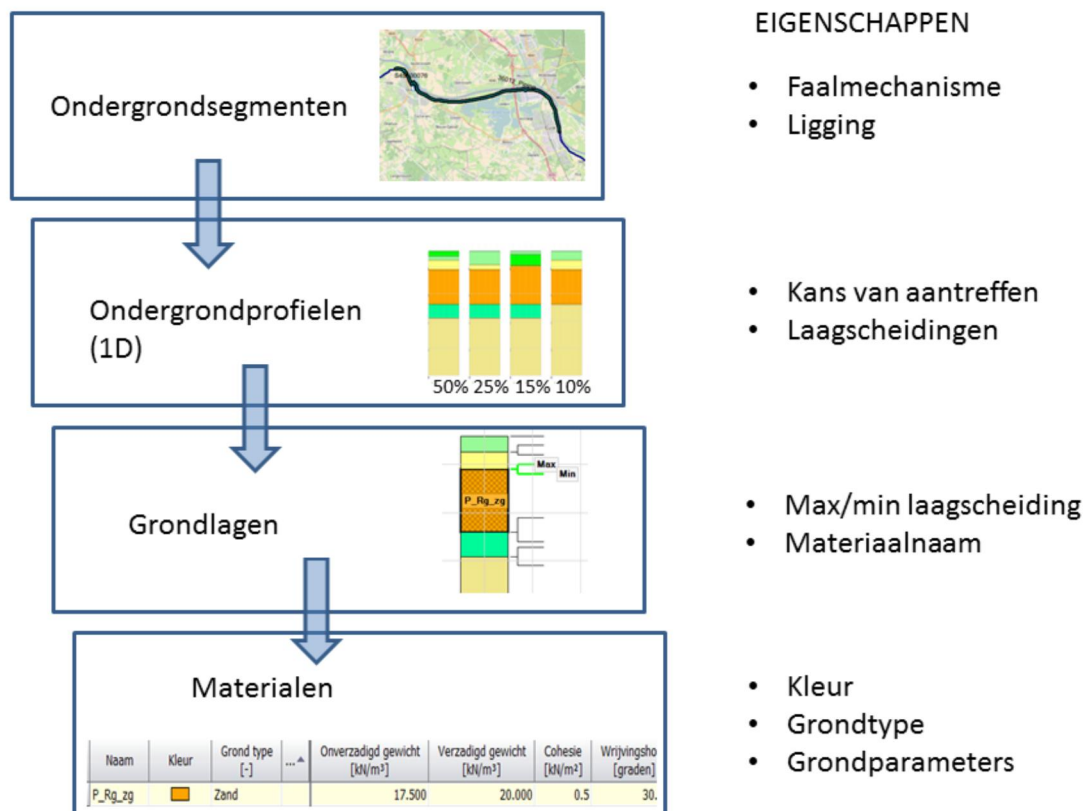
In GeoTOP is zeer veel lokale informatie verwerkt, zoals bijvoorbeeld ook het eerder vermelde onderzoek van de Universiteit van Utrecht naar het voorkomen van zandbanen in het rivierengebied. Het gebruik van stochastische interpolatietechnieken in de modellering maakte het mogelijk om voor elke voxel een kans op een bepaalde lithoklasse te berekenen. Ook van GeoTOP zijn een lagenmodel en een voxelmodel en GIS-bestanden te verkrijgen via het DINOloket. Ondanks de vele opgenomen bronnen van informatie kan GeoTOP slechts een raamwerk vormen voor de schematisatie van de ondergrond dat alleen na aanvulling met lokaal bodemonderzoek te gebruiken is als basis voor een gedetailleerd grondwatermodel. Het model verkeert nog in een ontwikkelingsstadium en is daarom nog niet landsdekkend.

Stochastische Ondergrond Schematisatie

De Stochastische Ondergrond Schematisatie WBI2017 is, per faalmechanisme, opgebouwd uit:

- Ondergrondsegmenten; dijkstrekkings met dezelfde ondergrondschematisatie.
- Ondergrondprofielen; bodemopbouw in verticale laagscheidingen met een kans van aantreffen.
- Ondergrondlagen; laag met hetzelfde materiaal.
- Materialen; materiaal met grondparameters.

Ondergrondsegmenten zijn opgebouwd uit meerdere (1D)ondergrondprofielen met ieder een kans van aantreffen. De profielen zijn op hun beurt opgebouwd uit grondlagen, elk bestaande uit een materiaal.



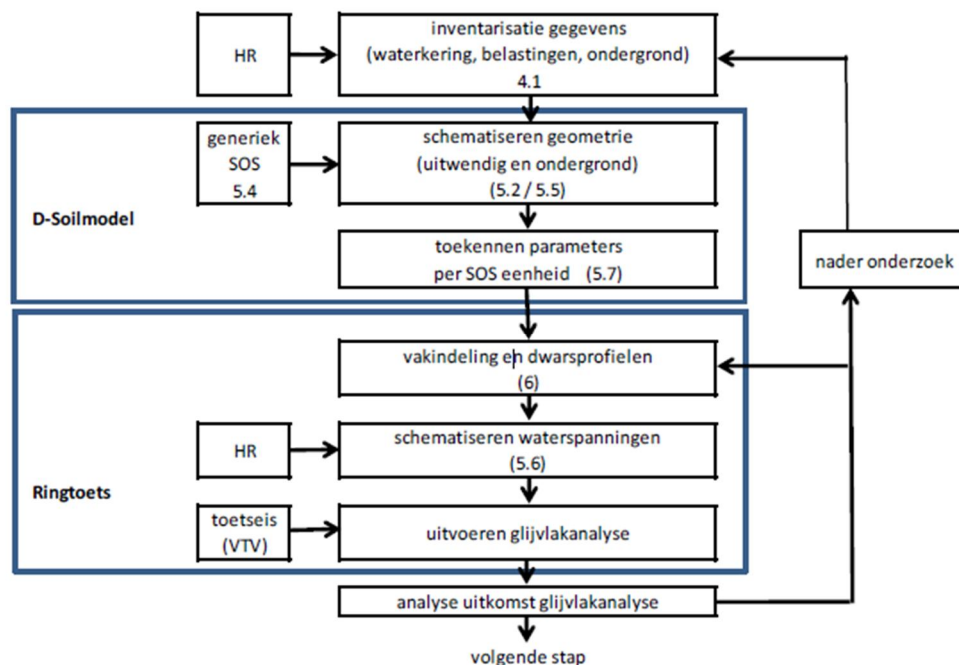
Figuur A.7 Opbouw van een eenheid in de Stochastische Ondergrond Schematisatie WBI2017



Per SOS-eenheid kunnen waarden voor de verschillende parameters worden vastgesteld. Op basis van SOS wordt de opbouw van de ondergrond met probabilistische methoden stochastisch gepresenteerd.

Dit Stochastisch Ondergrond Model (SOS) kan verder verfijnd worden met lokaal grondonderzoek. Van uitgevoerde veldproeven, zoals sonderingen en boringen, zijn de meetgegevens en beschrijvingen in de vorm van de GEF-bestanden. Maar ook inzet van geofysisch onderzoek (geoelektrisch onderzoek voor de diepere lagen of elektromagnetisch voor de ondiepere lagen) behoort tot de mogelijkheden. De bodemopbouw nabij de primaire waterkeringen kan verder worden aangevuld met bodemopbouw in de nabije omgeving, door gebruik te maken van informatie uit de ondergrondmodellen die aangeboden worden via DINOLoket, lokale verzamelingen van grondonderzoek door de betreffende waterschappen of uit eerder onderzoek, dan wel uit (bestaande) ondergrondmodellen of uit beschikbare geohydrologische modellen.

Er bestaan geen eenduidige recepten voor het opzetten van grondonderzoek en de benodigde dichtheid van grondonderzoekpunten. De opzet van grondonderzoek en de verfijning daarvan volgt uit onderkende onzekerheden over ondergrondopbouw of waterspanningen tijdens het schematiseren. Daarmee wordt ook duidelijk dat het opzetten van grondonderzoek en schematiseren een iteratief proces is. Uit een eerste grondonderzoek volgen indicatieve schematiseringen en tevens de onzekerheden in die schematiseringen. Het reduceren van die onzekerheden kan via gericht extra grondonderzoek. Of dit zinvol is, hangt mede af van het (verwachte) effect van deze onzekerheden in de faalmechanisme-analyses. De grondonderzoeksmethoden worden beschreven in het TR Waterkerende Grondconstructies (ENW, 2007b).



Figuur A.8 Overzicht van toets stappen bij toepassing van SOS