

Modellering verdroging veenkaden

Fase 1: verkenning

ir. H.T. Sman

1210277-000

Titel
Modellering verdroging veenkaden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA)	1210277-000	1210277-000-GEO-0004-	32

Trefwoorden
Veenkade, extreme droogte, verlaging freatische lijn, stabiliteit, modellering

Samenvatting

Als gevolg van droogte kan de sterkte van een veendijk verminderen, dit is onder andere gebleken bij de dijkverschuivingen te Wilnis en Terbregge in 2003. In een droge periode daalt de freatische lijn (grondwaterstand) in een waterkering. Bij veenkades resulteert een daling van de freatische lijn, geïnitieerd door droogte, in een volume- en een gewichtsafname van het veen waardoor de dijk lichter wordt. De mate waarin het veen lichter wordt (gewichtsafname en volume krimp) is zeker zo belangrijk als de verlaging van de freatische lijn. STOWA heeft Deltares opdracht verleend om met het, in het kader van het programma Kennis voor Klimaat, ontwikkelde model dgFlow, zoveel mogelijk gebruikmakend van de beschikbare monitoringgegevens, een analyse te doen van de mogelijke verlaging van de freatische lijn onder extreem droge omstandigheden. De achterliggende vraag is of het momenteel gehanteerde criterium, van een verlaging van de freatische lijn met 1,5 meter, een overschatting is van het werkelijke probleem.

Het model dgFlow is gekalibreerd voor het profiel Middelburgse kade te Boskoop. Voor deze locatie is op basis van de meteorologische gegevens van de jaren 2005 en 1976 de verlaging van de freatische lijn onder extreem droge omstandigheden beschouwd. Hierbij is 2005 gehanteerd als referentiejaar. In het jaar 1976 is het record neerslag te kort geregistreerd. Voor 1976 wordt een verlaging van de freatische lijn in de voet van de dijk berekend van 0,95 m.

Met het model is het effect van een tijdelijke verlaging van het Boezempeil met 0,5 meter beschouwd. Dit resulteert in een verdere verlaging van de freatische lijn in de voet van de dijk tot 1,15 m. Door de afname van de hydraulische belasting, levert deze peilverlaging een positieve bijdrage aan de stabiliteit van de kade. Met het model is het effect van het aanbrengen van een kleidek van 0,5 m op de veenkade beschouwd. Dit resulteert in een geringe extra verlaging van de freatische lijn. Het extra gewicht van het kleidek levert een positieve bijdrage aan de stabiliteit van de kade.

Met de modellering is een indruk verkregen van de mogelijke verlaging van de freatische lijn in een extreem droog jaar. De berekeningen zijn uitgevoerd met een model met bodemparameters uit een eerder onderzoek, die in onderhavige studie niet nader zijn geanalyseerd, waardoor de resultaten niet direct zijn toe te passen op andere veenkaden. Het verdient aanbeveling andere geometrieën en eigenschappen van veenkaden in model te brengen. Bijvoorbeeld door modelering uit te voeren voor het proefveld de Veendereij.

Referenties

JG140723001/475.130/HVM

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	okt. 2014	ir. H.T. Sman		ing. H.T.J. De Bruijn		ir. L. Voogt	

Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Vraagstelling	1
1.2 Leeswijzer	1
2 Beschikbare gegevens	1
2.1 Locatie Middelburgse kade	1
2.2 Peilbuizen en grondwaterstijghoogten	1
2.3 Meteorologische gegevens	3
2.3.1 Discussie	4
3 Berekeningen	1
3.1 Kalibratieperiode 2004 – 2006	1
3.1.1 Inleiding	1
3.1.2 Grondwaterstijghoogten	1
3.1.3 SafetyFactor	2
3.2 Extreem droge jaar 1976	3
3.2.1 Inleiding	3
3.2.2 Grondwaterstijghoogten	3
3.2.3 SafetyFactor	4
3.2.4 Discussie	4
3.3 Omgevingsinvloeden	5
3.3.1 Inleiding	5
3.3.2 Grondwaterstijghoogten	5
3.3.3 SafetyFactor	6
3.3.4 Discussie	7
3.4 Mitigerende maatregel – toepassen kleidek	7
3.4.1 Inleiding	7
3.4.2 Grondwaterstijghoogten	8
3.4.3 SafetyFactor	9
3.4.4 Discussie	9
4 Conclusies en aanbevelingen	1
4.1 Conclusies	1
4.2 Aanbevelingen	2
5 Referenties	3

Bijlage(n)

A Meteorologische gegevens	5
A.1 Kalenderjaar 1976	5
A.2 Kalenderjaar 2004	7
A.3 Kalenderjaar 2005	8
A.4 Kalenderjaar 2006	9
B Grondwaterstijghoogten	11
B.1 Monitoring Middelburgse kade 2004-2005	11
C SafetyFactoren	C-1
C.1 Kalibratieperiode 2004-2006	C-1
C.2 Extreem droge periode 1976	C-1
D Bodemparemeters	D-1

1 Inleiding

Als gevolg van droogte kan de sterkte van een veendijk verminderen, dit is onder andere gebleken bij de dijkverschuivingen te Wilnis en Terbregge in 2003. In dat jaar vond er op circa 50 locaties verspreid over het land serieuze scheurvorming in of vervormingen van (veen)kades plaats [1].

In een droge periode daalt de freatische lijn (grondwaterstand) in een waterkering. Bij de meeste waterkeringen zal een daling van de freatische lijn leiden tot een toename van de sterkte. Dit komt doordat de waterspanning afneemt terwijl de grondspanning min of meer constant blijft. Hierdoor neemt de effectieve spanning toe en daarmee de sterkte van de waterkering.

Bij veenkades is dat anders omdat de daling van de freatische lijn, geïnitieerd door droogte, gepaard gaat met een volume- en een gewichtsafname van het veen waardoor de dijk lichter wordt. De mate waarin het veen lichter wordt (gewichtsafname en volume krimp) is zeker zo belangrijk als de verlaging van de freatische lijn.

Voor een veenkade wordt bij de toetsing op sterkte, voor extreem droge omstandigheden, uitgegaan van een verlaging van de freatische lijn met 1,5 meter. Dit is een “worst case” benadering, afgeleid van de analyse van de verschuiving van de veenkade te Wilnis in 2003.

In het kader van het programma Kennis voor Klimaat heeft Deltares, in opdracht van STOWA binnen het INCAH project het numeriek model dgFlow ontwikkeld, waarmee de waterhuishouding in een veendijk kan worden gesimuleerd. Met dit model kunnen zowel de freatische lijn als de stabiliteit van het dijklichaam worden berekend, onder veranderende hydraulische en meteorologische omstandigheden [2].

STOWA is bezig met een nadere onderbouwing van het droogtecriterium voor het toetsen van veenkades. Hiertoe zijn een aantal veendijken voorzien van peilbuizen en wordt het verloop van de freatische lijn in het dijklichaam gemonitord. Een dergelijke monitoring is onder andere uitgevoerd op, in onderhavige rapportage beschouwde Middelburgse kade in Boskoop.

1.1 Vraagstelling

STOWA heeft Deltares opdracht verleend, met kenmerk JG140723001/475.130/HVM d.d. 28 juli 2014, om met het ontwikkelde model dgFlow, zoveel mogelijk gebruikmakend van de beschikbare monitoringgegevens, een analyse te doen van de mogelijke verlaging van de freatische lijn onder extreem droge omstandigheden. De achterliggende vraag is of het momenteel gehanteerde criterium een overschatting is van het werkelijke probleem.

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een overzicht opgenomen van beschikbare gegevens. In hoofdstuk 3 zijn de berekeningen opgenomen, waarbij zowel het aspect grondwater als stabiliteit zijn beschouwd. Hierbij zijn drie stappen doorlopen.

Stap 1: Extreme droogte profiel Middelburgse kade

In deze stap is gebruik gemaakt van het voor de kalibratie van het model dgFlow gebruikte profiel Middelburgse kade. Voor dit profiel is het verloop van de freatische lijn berekend voor 2 reeksen van meteorologische gegevens over een periode van 3 kalenderjaren. De eerste reeks heeft betrekking op de kalibratie periode 2004-2006. Uit deze reeks is 2005 gekozen als “referentiesituatie”. Voor de droge reeks is uitgegaan van het extreem droge jaar 1976. Om ook hier een reeks van drie jaren te construeren, is een periode van 1975 – 1977 beschouwd, waarbij voor elke van de jaren de meteorologische gegevens van het jaar 1976 zijn gebruikt.

Stap 2: Omgevingsinvloed profiel Middelburgse kade

De verwachting is dat de waterstand in de omgeving van de kade mede van invloed zal zijn op het effect van verdroging. Om hier meer inzicht in te krijgen is met de datasets uit stap 1 een extra situatie doorerekend, waarbij het waterpeil in de boezem 0,5 m lager staat.

Stap 3: Invloed aanwezigheid kleidek profiel Middelburgse kade

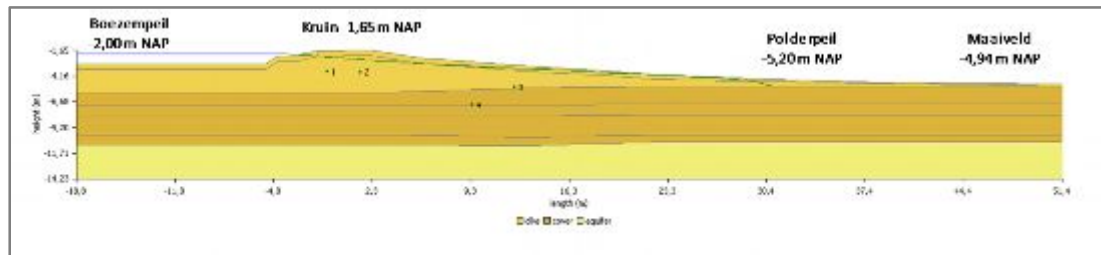
De verwachting is dat de aanwezigheid van klei op veen de uitdroging van de kade in sterke mate zal beperken. Om dit modelmatig nader te kwantificeren is een aanvullende berekening uitgevoerd met de meteorologische sets van stap 1, waarbij in het profiel van de dijk de bovenste 0,5 m veenlaag is vervangen door een kleilaag van 0,5 m dik.

Conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 4 en referenties in hoofdstuk 5. In de bijlagen zijn een aantal grafieken met achterliggende gegevens opgenomen. In bijlage A gegevens van neerslag en verdamping van de beschouwde jaren. In bijlage B enkele aanvullende grafieken met grondwatergegevens. In bijlage C enkele grafieken met berekenen SafetyFactor. In bijlage D tenslotte zijn de gebruikte bodemparameters samengevat.

2 Beschikbare gegevens

2.1 Locatie Middelburgse kade

De locatie Middelburgse kade betreft een veendijk op een hoofdzakelijk venige ondergrond in Boskoop. Op deze locatie zijn in de periode 2004 – 2005 diverse metingen uitgevoerd. In Figuur 2.1 is een verticaal dwarsprofiel over de gemonitorde kade weergegeven. In de figuur zijn de verschillende (water)niveaus weergegeven. Tevens zijn de verschillende onderscheiden model/bodemlagen weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt naar de modellagen “dike”, “cover” en “aquifer”. Binnen deze modellagen worden nog afzonderlijke bodemlagen onderscheiden. De modellagen “dike” en “cover” bestaan hoofdzakelijk uit de bodemlagen veen. De “aquifer” betreft de watervoerende zanden. In bijlage D is een overzicht opgenomen van de bodemparameters van de onderscheiden lagen.



Figuur 2.1 Verticaal dwarsprofiel over Middelburgse kade met niveaus en afstelling peilfilters

De sterkte parameters gebruikt voor deze case zijn afgeleid ten behoeve van een eerder uitgevoerd onderzoek op basis van met name vane testen en andere eenvoudig uit te voeren testen. De sterkte is uitgedrukt als een gedraineerde c - en ϕ -relatie. Hieruit volgen voor de veenlagen 3 sets van parameters. Voor de veenlagen aan de top van het pakket (op de grens van de verzadigde zone) is een cohesie van 2 kPa en een hoek van inwendige wrijving van 12 graden gehanteerd voor de wat diepere veenlagen is een cohesie van 8 en een hoek van inwendige wrijving van 20 graden gehanteerd. In de diepere veenlagen is een cohesie van 3 kPa en een ϕ van 12 graden gehanteerd.

In de veensoorten met een hoek van inwendige wrijving van 12 graden en een cohesie van 2 tot 3 zal de invloed van een verandering van effectieve spanning als gevolg van het lichter worden van het veen en de fluctuaties van de waterstand op de totaal te mobiliseren schuifsterkte niet zo groot zijn. De cohesie zal hier dominant zijn en die is spanningsonafhankelijk. De invloed op de stabiliteit van de veranderingen van de waterstand wordt daarmee hoofdzakelijk veroorzaakt door de verandering in aandrijvend moment. Wanneer een hogere hoek van inwendige wrijving in het veen aanwezig is (stel 17 graden) met een lagere cohesie (stel 1 kPa) dan wordt een andere relatie gevonden tussen fluctuaties van de freatische lijn en de SafetyFactor. De tendens van de in deze case aangetoonde relaties tussen SafetyFactor en grondwaterdrukken is daarmee juist, maar kan in andere situatie (andere parameters voor het veen) afwijken (meer invloed veranderingen van de effectieve spanning).

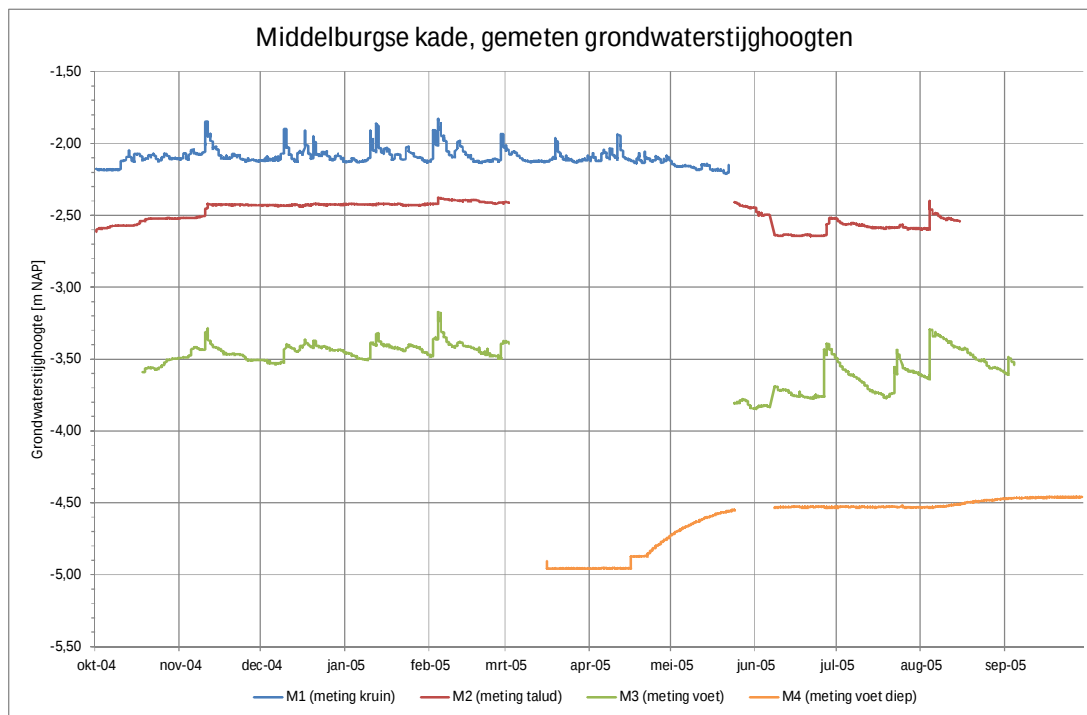
2.2 Peilbuizen en grondwaterstijghoogten

Het ontwikkelde model is gekalibreerd voor de Middelburgse kade [2]. De kalibratieperiode betreft de jaren 2004 t/m 2005. In deze periode zijn op locatie 4 peilbuizen gemonitord, waarbij per uur een grondwaterstijghoogte is geregistreerd. Kenmerken van de meetlocaties zijn samengevat in Tabel 2.1, de afstelling van de peilfilters is ook weergegeven in Figuur 2.1.

Label	M1	M2	M3	M4
Locatie	Kruin	Talud	Voet	Voet diep
Filterlengte [m]	0,25	0,25	0,25	0,25
Filterdiepte [m-mv]	2,25	2,25	2,25	4,20
Filterdiepte [m NAP]	-3,79	-3,80	-5,11	-7,04
Afstand uit de kruin [m]	-0,94	1,40	12,41	9,41
Eerste meting	7-10-'04	7-10-'04	26-10-'04	24-03-'05
Laatste meting	1-06-'05	7-10-'05	7-10-'05	7-10-'05
Gemiddelde grondwaterstijghoogte [m NAP]	-2,10	-2,50	-3,53	-4,62

Tabel 2.1 Karakteristieken en gemiddeld gemeten grondwaterstijghoogte Middelburgse kade

De metingen van de grondwaterstijghoogten zijn niet gelijktijdig gestart en ook niet gelijktijdig beëindigd. Verder is er in de periode van april 2005 sprake geweest van een onderbreking in de metingen. De gemeten waarden zijn weergegeven in Figuur 2.2, waarbij opvalt dat de dynamiek in peilfilter M4 zeer beperkt is en dat dit filter na plaatsing geruime tijd een geleidelijke verandering van de grondwaterstijghoogte heeft laten zien. In Tabel 2.1 is de gemiddelde grondwaterstijghoogte vermeld, berekend op basis van alle beschikbare meetgegevens per peilfilter.



Figuur 2.2 Gemeten grondwaterstijghoogten Middelburgse kade peilfilters M1 t/m M4

2.3 Meteorologische gegevens

Meteorologische gegevens voor de kalibratieperiode zijn opgenomen in bijlage A. Het betreft deels lokaal geregistreerde gegevens, aangevuld met gegevens van het weerstation Rotterdam. De drie achtereenvolgende jaren kunnen als volgt gekarakteriseerd worden;

2004: Vrij nat met bovengemiddelde temperatuur

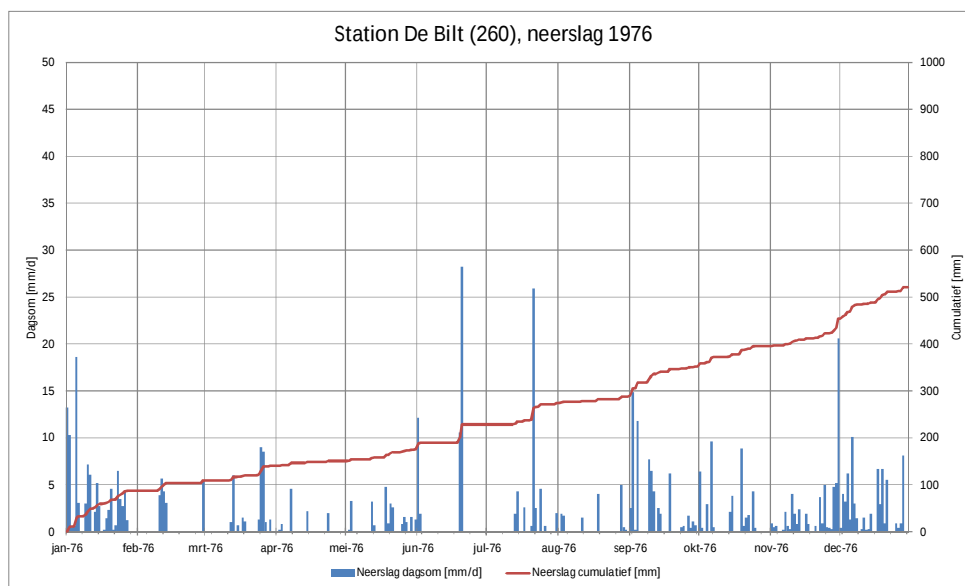
2005: Zeer warm, zeer zonnig, met een normale hoeveelheid neerslag.

2006: Record warm, zeer zonnig en vrijwel de normale hoeveelheid neerslag

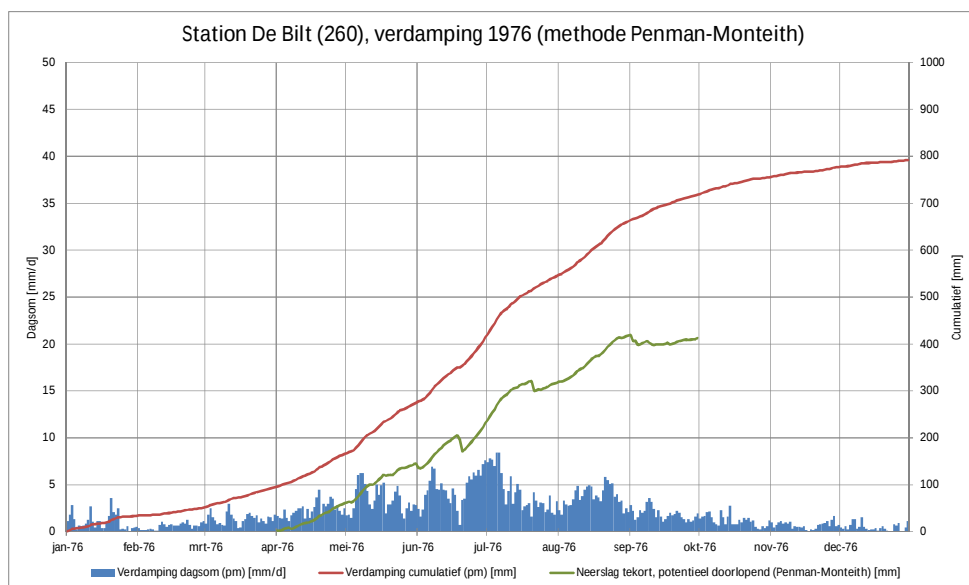
Voor de berekening van het uitzakken van de freatische lijn is het extreem droge jaar 1976 beschouwd. De karakteristieken van dit jaar zijn eveneens opgenomen in bijlage A. Dit betreft gegevens voor weerstation De Bilt, omdat voor dit station voor deze datum een complete set meteorologische gegevens beschikbaar is (wat voor station Rotterdam niet het geval is).

In Figuur 2.3 is de neerslag voor 1976 grafisch weergegeven, met tegen de linker-as de dagsom en tegen de rechter-as de cumulatieve hoeveelheid neerslag. De cumulatieve hoeveelheid neerslag in 1976 voor De Bilt bedraagt 523 mm, terwijl de normale waarde 829 mm bedraagt (zie ook bijlage A1).

In Figuur 2.4 is de referentie gewasverdamming (mm) voor 1976 grafisch weergegeven, met tegen de linker-as de dagsom en tegen de rechter-as de cumulatieve hoeveelheid referentie gewasverdamming (mm), alsmede het doorlopend potentieel neerslag tekort. De cumulatieve hoeveelheid referentiegewasverdamming in 1976 voor De Bilt bedraagt 617 mm, terwijl de normale waarde 829 mm bedraagt. Op 30 september bedroeg het doorlopend potentieel neerslag tekort 307 mm (zie ook bijlage A1).



Figuur 2.3 Meteorologische gegevens station De Bilt: neerslag in 1976



Figuur 2.4 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 1976 (Penman-Monteith)

2.3.1 Discussie

In dgFlow is voor de berekening van de verdamping gebruik gemaakt van de benadering volgens Penmann-Monteith. Deze methode die meer meteorologische gegevens gebruikt dan de methode Makkink, is met name buiten het groeiseizoen nauwkeuriger in de bepaling van de potentiële verdamping. De gekozen methode in dgFlow is echter nog niet gevalideerd. De berekende cumulatieve verdamping over het jaar zijn vergeleken met de waarden verkregen met de methode Makkink aanzienlijk hoger (zie verder bijlage A).

3 Berekeningen

3.1 Kalibratieperiode 2004 – 2006

3.1.1 Inleiding

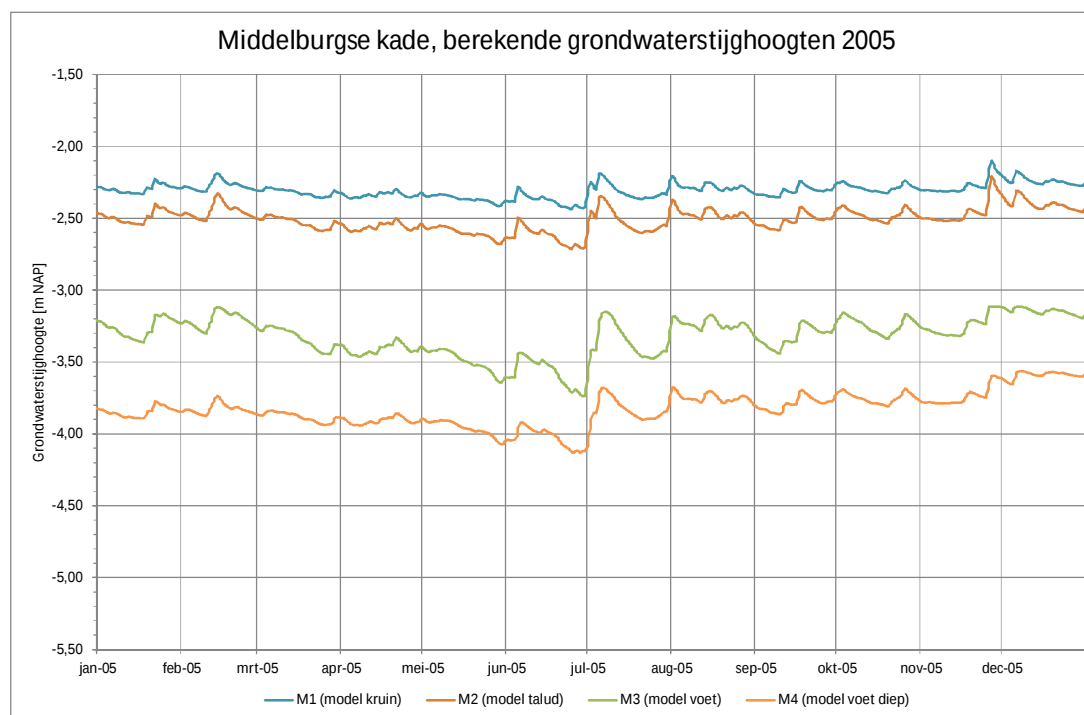
Op basis van de uitgevoerde kalibratie, de beschikbaarheid van gegevens en de meteorologische karakterisering van de jaren 2004 t/m 2006, is het jaar 2005 geselecteerd als meest geschikte referentiejaar voor onderhavig berekeningen. Het jaar wordt gekarakteriseerd als zeer warm, zeer zonnig, met een normale hoeveelheid neerslag (zie verder bijlage A).

3.1.2 Grondwaterstijghoogten

Met het gekalibreerde model dgFlow zijn, voor het jaar 2005, de grondwaterstijghoogten in de vier aanwezige peilfilters berekend. Het verloop van de berekende grondwaterstijghoogten is weergegeven in Figuur 3.1. Enkele karakteristieken van deze berekening zijn samengevat in Tabel 3.1.

Peilbuis	M1(kruin)	M2 (talud)	M3 (voet)	M4 (diep)
Gemiddelde waarde [m NAP]	-2,31	-2,51	-3,32	-3,83
Minimale waarde [m NAP]	-2,44	-2,72	-3,74	-4,13
Maximale waarde [m NAP]	-2,10	-2,21	-3,11	-3,56

Tabel 3.1 Karakteristieken berekende grondwaterstijghoogten Middelburgse kade, voor 2005



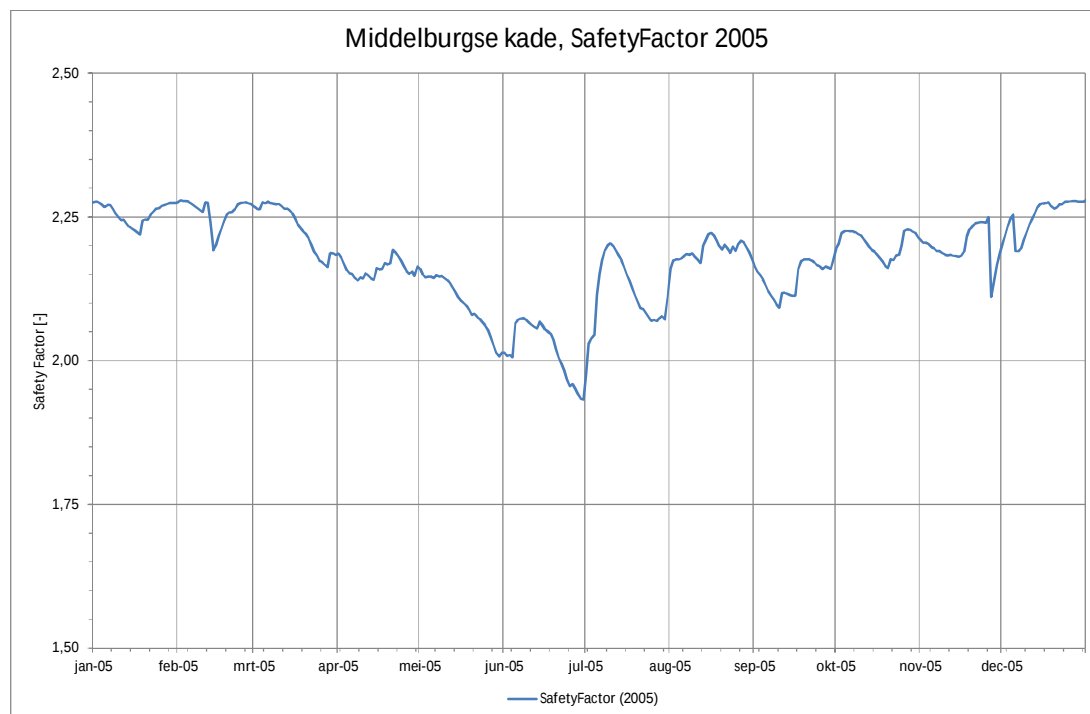
Figuur 3.1 Berekende grondwaterstijghoogten Middelburgse kade, 2005 (referentiejaar)

Uit de grafiek (Figuur 3.1) volgt dat de laagste waarden in de vier peilbuizen eind juni worden berekend, waarna de grondwaterstijghoogte vrij snel hersteld. De waarde die begin juli wordt berekend is maar iets lager dan de hoogste waarde die eind november wordt berekend.

3.1.3 SafetyFactor

Met het gekalibreerde model is de stabiliteit van de kade berekend, onder de verschillende meteorologische en daarmee geohydrologische condities. De grondwatermodellering is een semi 3D berekening, gebaseerd op de Dupuit-benadering. Voor de stabiliteitsberekening is gebruik gemaakt van de methode Bishop. Een overzicht van de gebruikte parameters is opgenomen in bijlage D. De stabiliteit is gerepresenteerd met een zogenaamde SafetyFactor, waarbij een waarde van 1,0 staat voor de situatie waarbij juist evenwicht aanwezig is. Een waarde groter dan 1,0, bij toepassing van verwachtingswaarde voor de schuifsterkte betekent dat de kade juist stabiel is. Hierbij wordt opgemerkt dat dit niets zegt over het toetscriterium voor de stabiliteit van deze regionale kering. Deze moet worden bepaald met rekenwaarde voor de schuifsterkte waarbij de hydraulische belasting afhankelijk is van de economische gevolgschade van de waterkering. De genoemde waarde van 1,0 geldt voor gemiddelde, of verwachtingswaarde voor de sterkte en zegt daarmee niets over het werkelijke veiligheidsniveau van de dijk. De vergelijking van de afname van de schuifsterkte moet ook in dat licht worden beschouwd, niet als een veiligheidsoordeel maar als een effect. In Figuur 3.2 is de berekende SafetyFactor voor het jaar 2005 weergegeven.

De laagste SafetyFactor wordt berekend voor eind juni met een waarde van 1,93.



Figuur 3.2 Berekende SafetyFactor Middelburgse kade, 2005 (referentiejaar)

3.2 Extreem droge jaar 1976

3.2.1 Inleiding

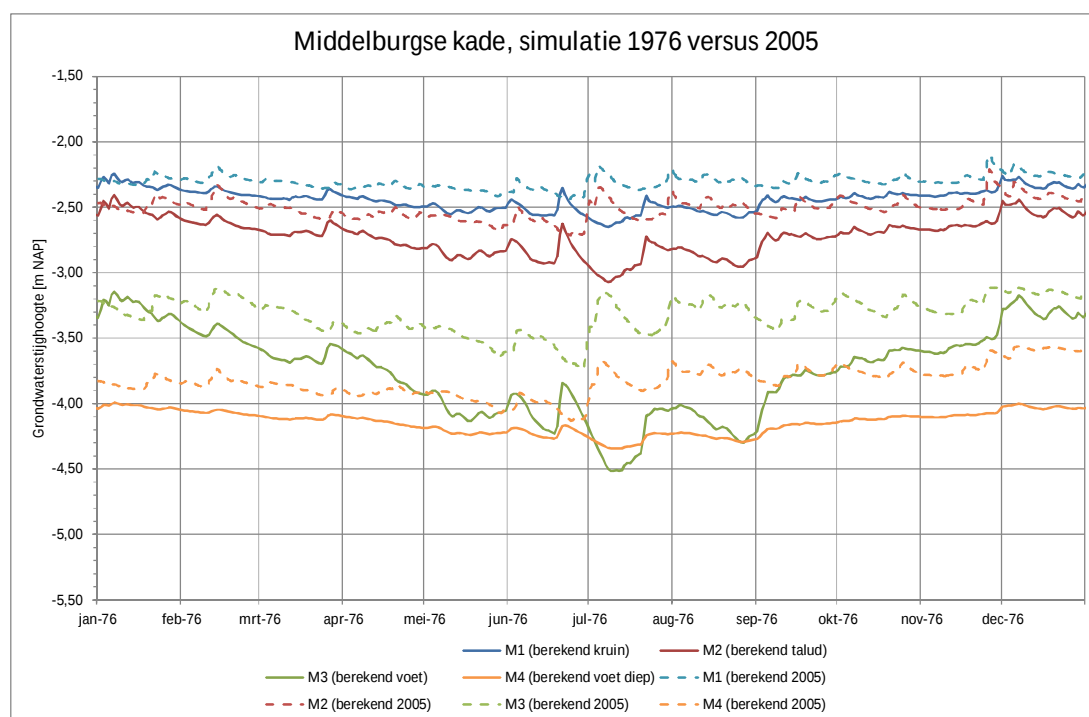
Om het effect van de verlaging van de freatische lijn als gevolg van extreme droogte te kunnen modelleren is voor de Middelburgse kade een modelberekening gemaakt met de meteorologische gegevens van 1976. Dit betreft een extreem droog jaar, waarin het record neerslag tekort is opgetreden (307 mm in De Bilt, zie verder bijlage A1). Om eventuele effecten over de jaargrens heen te kunnen beoordelen is een periode van drie jaar door-gerekend, waarbij voor de meteorologische gegevens telkens is uitgegaan van het jaar 1976.

3.2.2 Grondwaterstijghoogten

Met het model dgFlow zijn voor het jaar 1976 de grondwaterstijghoogte in de vier aanwezige peilfilters berekend. Het verloop van de berekende grondwaterstijghoogten is weergegeven in Figuur 3.3. Ter vergelijik zijn tevens de berekende waarden voor 2005 in de figuur weer-gegeven. Enkele karakteristieken van deze berekening zijn samengavat in Tabel 3.2.

Peilbuis	M1	M2	M3	M4
Gemiddelde waarde [m NAP]	-2,44	-2,72	-3,75	-4,14
Minimale waarde [m NAP]	-2,65	-3,07	-4,52	-4,34
Maximale waarde [m NAP]	-2,24	-2,41	-3,14	-3,99

Tabel 3.2 Karakteristieken berekende grondwaterstijghoogten Middelburgse kade, voor 1976

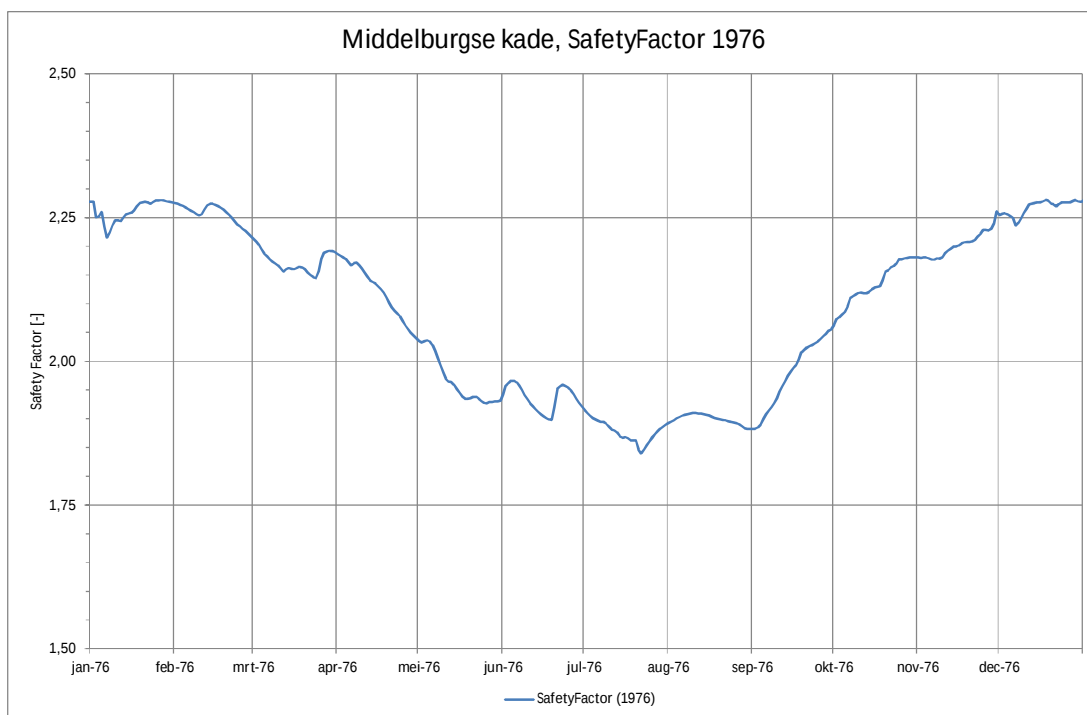


Figuur 3.3 Berekende grondwaterstijghoogten monitoringfilters Middelburgse kade voor 1976 en 2005 (2005 verschoven in de tijd om vergelijk mogelijk te maken).

Uit de grafiek (Figuur 3.3) volgt dat de laagste waarden in de vier peilbuizen eind juni wordt berekend, waarna de grondwaterstijghoogte vrij snel hersteld. De waarde die begin juli wordt berekend is maar iets lager dan de hoogste waarde die eind november wordt berekend.

3.2.3 SafetyFactor

Met dgFlow model is het verloop van de stabiliteit van de kade over het jaar berekend. In Figuur 3.4 is de berekende SafetyFactor voor het jaar 1976 weergegeven. De laagste SafetyFactor wordt berekend voor midden juli met een waarde van 1,85. De hoogste waarden worden berekend in de winterperiode, met een maximum van 2,28.



Figuur 3.4 Berekende SafetyFactor Middelburgse kade, 1976 (extreem droog jaar)

3.2.4 Discussie

De grootste verlaging van de freatische lijn in 1976 vergeleken met 2005 treedt op in de zomer. In Tabel 3.3 is de gemiddeld berekende grondwaterstijghoogten voor de maand juli weergegeven voor beide beschouwde jaren. Uit de tabel volgt dat door de droogte de freatische lijn wordt verlaagd. De verlaging is het sterkste in de voet met een gemiddelde verlaging van 0,95 m. De verlaging nabij de kruin van de dijk is met 0,25 m relatief gering. Dat de verlaging door droogte bij deze kade het grootst is in de voet, hoeft niet representatief te zijn voor andere veenkades. De lengte van het talud en het waterstandsverschil over de kade zullen sterk bepalend zijn voor de reactie van de freatische lijn op een verdroging.

Peilbuis	M1 kruin	M2 talud	M3 voet	M4 diep
Gemiddelde juli 1976 [m NAP]	-2,56	-2,93	-4,30	-4,29
Gemiddelde juli 2005 [m NAP]	-2,31	-2,51	-3,35	-3,82
Verskil [m]	-0,25	-0,42	-0,95	-0,47

Tabel 3.3 Berekende grondwaterstijghoogte Middelburgse kade, in juli 1976 en juli 2005

De laagste SafetyFactor wordt berekend in de zomer van het extreem droge jaar 1976. De waarde bedraagt 1,85. In het referentiejaar (2005) is in de zomer een minimale SafetyFactor berekend van 1,93. In de droge periode neemt de stabiliteit van de kade verder af.

Opvallend is dat in het extreem droge jaar de SafetyFactor over een langere periode duidelijk lager is dan de waarde in 2005, maar dat de minimale waarde van de SafetyFactor in beide jaren een relatief klein verschil laten zien (1,93 versus 1,85).

Met betrekking tot het verloop van de freatische lijn in de kade bestond de indruk dat een droge periode ook in het jaar volgend op de droogte nog van invloed zou zijn op de hoogte van de freatische lijn in de dijk en de ontwikkeling van de SafetyFactor. Om dit te kunnen beoordelen zijn drie achtereenvolgende jaren doorgerekend, waarbij telkens gebruik is gemaakt van de meteorologische gegevens van 1976. Het blijkt dat alleen in het eerste rekenjaar sprake is van een iets afwijkend verloop in de maand januari. Dit kan volledig toegeschreven worden aan de initialisatie van het model (begintoestand). Het verloop in de rekenjaren 2 en 3 is volledig identiek. In bijlage C is het verloop van de SafetyFactor grafisch weergegeven.

3.3 Omgevingsinvloeden

3.3.1 Inleiding

Uitgaande van de berekeningen voor het extreem droge jaar 1976 is de invloed van omgevingsfactoren nader geanalyseerd. Hierbij is als scenario een lagere waterstand in de Boezem beschouwd. Hiervoor is aangenomen dat het boezempeil in de droge periode 0,5 m lager staat. Als droge periode is uitgegaan van een periode van 31 dagen in de maand juli.

3.3.2 Grondwaterstijghoogten

In Figuur 3.5 zijn de berekende grondwaterstijghoogten voor 1976 weergegeven voor de situatie met en zonder verlaagd Boezempeil.

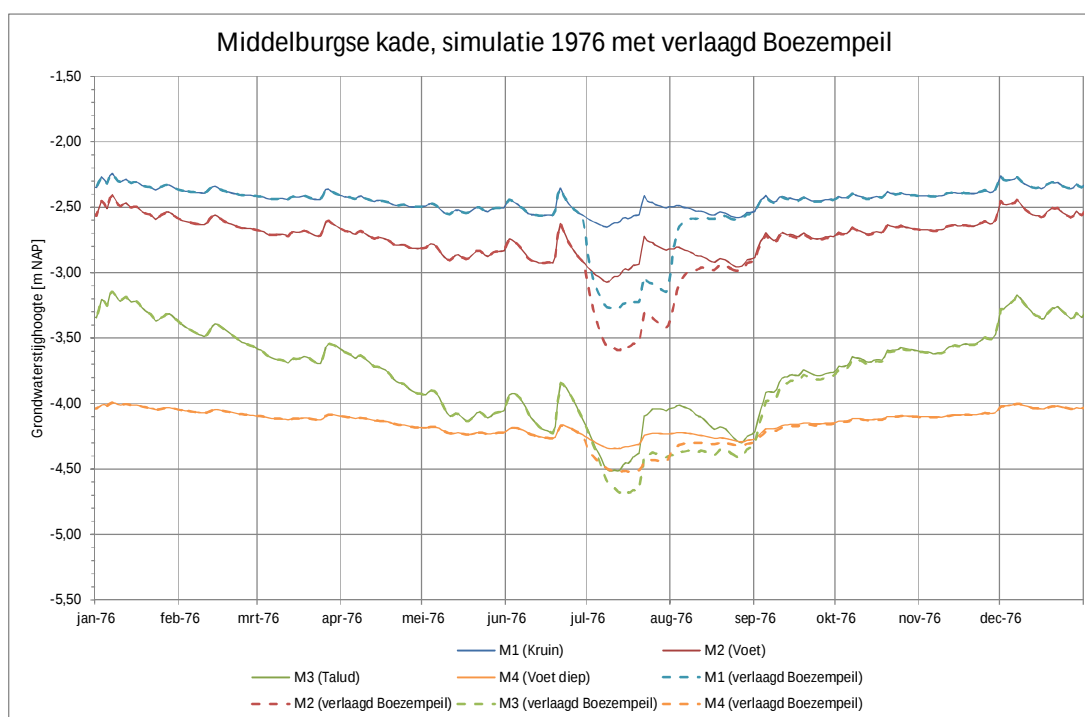
Uit de grafiek volgt dat de verlaging van het Boezempeil zich vrij snel, enkele dagen, vertaald naar een verlaging van de freatische lijn. Het eerst is dit merkbaar in de peilbuis in de kruin, in de voet van de dijk is de verlaging later waarneembaar. In het talud en de voet van de dijk is de uiteindelijke verlaging van de freatische lijn ook geringer dan die berekend in de kruin. Gemiddeld over de maand juli bedraagt de verlaging van de freatische lijn 0,6 m in de kruin en 0,20 m in de voet. Dit in vergelijking tot de berekening voor 1976 zonder verlaging van het Boezempeil, zie Tabel 3.4.

Het herstel van de freatische lijn duurt langer dan de verlaging. Na circa 1 maand zijn de berekende grondwaterstijghoogten ongeveer gelijk aan de berekening voor 1976 zonder tijdelijke verlaging van het Boezempeil, zie Figuur 3.5.

Wanneer de verlaging van de freatische lijn als gevolg van een tijdelijke verlaging van het Boezempeil in 1976 wordt vergeleken met de berekende freatische lijn in 2005 (referentiesituatie), dan wordt de grootste verlaging berekend in de voet van de dijk (peilbuis M3). Gemiddeld over de maand juli wordt voor peilbuis M3 een verlaging berekend van 1,15 m (Tabel 3.4). Ook in de situatie zonder verlaging van het Boezempeil werd de grootste verlaging van de freatische lijn berekend voor peilbuis M3. Zonder aanpassing van het Boezempeil bedroeg de berekende verlaging 0,95 m (Tabel 3.3). Opgemerkt wordt dat deze bevindingen niet direct zijn door te vertalen naar andere veenkades. De randvoorwaarden in het profiel (Boezempeil en polderpeil) bepalen in sterke mate welk een maximale verlaging door droogte kan optreden. Ook de begroeiing van de kade is medebepalend voor de omvang van de verdroging.

Peilbuis	M1 (kruin)	M2 (talud)	M3 (voet)	M4 (diep)
Gemiddelde juli 2005 [m NAP]	-2,31	-2,51	-3,35	-3,82
Gemiddelde juli 1976 [m NAP]	-2,56	-2,93	-4,30	-4,29
Gemiddelde juli 1976, met 0,5 m lager boezempeil in juli [m NAP]	-3,16	-3,44	-4,50	-4,47
Vershil t.o.v. 1976 [m]	-0,60	-0,52	-0,20	-0,18
Vershil t.o.v. 2005 [m]	-0,85	-0,93	-1,15	-0,65

Tabel 3.4 Berekende grondwaterstijghoogte Middelburgse kade voor juli 1976, uitgaande van een 0,5 m verlaagd boezempeil in juli, versus eerdere berekeningen voor 1976 en 2005 (referentiejaar)



Figuur 3.5 Berekende grondwaterstijghoogten Middelburgse kade (1976) vast peil in de boezem en verlaagd boezempeil met 0,5 m in de maand juli

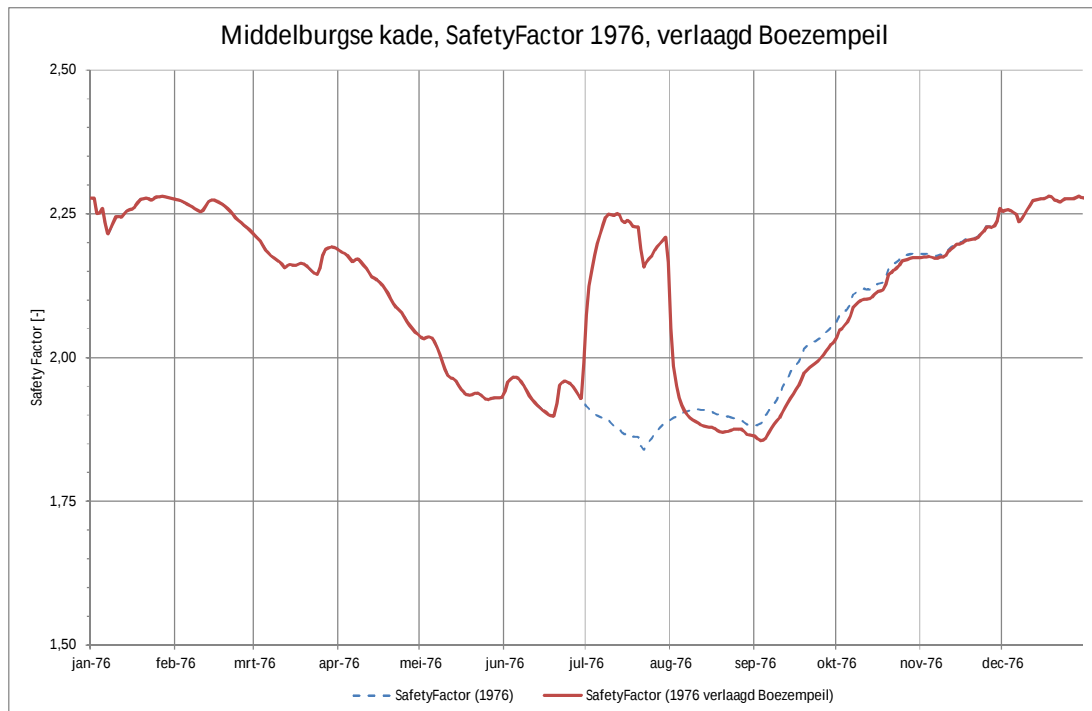
3.3.3 SafetyFactor

In Figuur 3.6 is het verloop van de berekende SafetyFactor weergegeven voor 1976, met en zonder tijdelijke aanpassing van het Boezempeil. In het verloop van de SafetyFactor is de verlaging van de freatische lijn als gevolg van de tijdelijke verlaging van het Boezempeil duidelijk terug te zien. De effecten lijken ook langer door te werken (tot december), dan direct is af te leiden uit de verandering in de berekende grondwaterstijghoogten (tot oktober). Het eerste effect dat optreedt, is dat de SafetyFactor in juli toeneemt. Dit kan verklaard worden uit een reductie van de belasting op de kade door de peilverlaging in de Boezem. Zolang er sprake is van een verlaagd Boezempeil, is de SafetyFactor hoger dan in de situatie zonder Boezempeilverlaging.

Wanneer in augustus het Boezempeil terug is op zijn oorspronkelijke waarde, daalt de SafetyFactor aanzienlijk. Hij daalt in augustus duidelijk onder de waarde die wordt berekend voor de situatie zonder Boezempeilverlaging. Dit is te verklaren doordat het herstel van het Boezempeil, het herstel van de belasting betekent. Doordat de verlaging van het Boezempeil

heeft geresulteerd in een “extra verdroging” van de kade, is de sterkte van de kade minder dan in de situatie zonder tijdelijke verlaging van het Boezempeil.

De combinatie van factoren heeft tot gevolg dat met de tijdelijke verlaging van het Boezempeil de berekende minimale SafetyFactor met een waarde van 1,86 marginaal hoger blijft dan de 1,85 die wordt berekend zonder tijdelijke verlaging van het Boezempeil.



Figuur 3.6 Berekende SafetyFactor Middelburgse kade (1976) vast peil in de boezem en verlaagd boezempeil met 0,5 m in de maand juli

3.3.4 Discussie

Een verlaging van het Boezempeil, al of niet bewust tot stand gebracht, heeft een extra verlaging van de freatische lijn tot gevolg en daarmee een verdere verdroging van de veenkade. Voor de beschouwde kade hoeft het verlagen van het Boezempeil dan ook niet direct een negatief effect te hebben op de sterkte van de kade. Doordat de verlaging van het Boezempeil ook resulteert in een verlaging van de belasting op de kade, kan er sprake zijn van een verhoging van de SafetyFactor. Er kan een extra kritische situatie ontstaan wanneer het waterpeil in de Boezem wordt hersteld. Wanneer de kade dan nog niet vernat is uit andere bron (bijvoorbeeld neerslag), dan zal het herstel van de belasting op de extra droge kade resulteren in een verdere afname van de SafetyFactor. Bij het gekozen scenario in bovenstaande modellering bleek dit niet het geval te zijn. Opgemerkt wordt dat deze conclusie niet direct doorvertaald kan worden naar andere veenkades, daar de reactie van het systeem sterk afhankelijk is van geometrie, (grond)waterpeilen en bodemparameters.

3.4 Mitigerende maatregel – toepassen kleidek

3.4.1 Inleiding

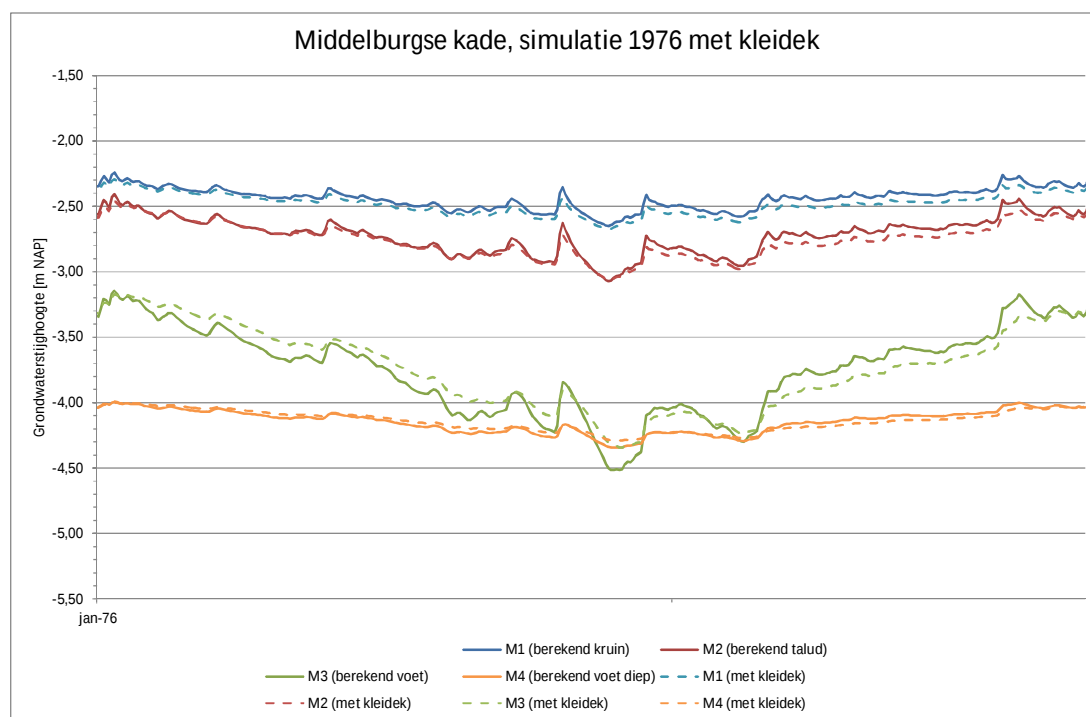
Een van de mogelijke maatregelen om uitdroging van een veenkade te beperken is het aanbrengen van een kleidek. Het effect van het aanbrengen van een kleidek is met onderhavig model doorgerekend. Modelmatig is dit gerealiseerd door de venige toplaag die in het model

aanwezig is te vervangen door klei. Hierbij zijn de volgende bodemparameters toegepast (zie ook bijlage D):

Laagdikte:	0,5	[m] (zie ook Figuur 2.1)
Doorlatendheid klei	0,05	m/d (horizontaal en verticaal)
Porositeit klei	0,45	[-]
Soortelijk gewicht	13	kN/m ² (droog en nat)

3.4.2 Grondwaterstijghoogten

De berekening van het verloop van de freatische lijn is uitgevoerd met de meteorologische gegevens van 1976, waarbij ook 1975 en 1977 zijn doorgerekend met dezelfde meteorologische gegevens. Gedurende de gehele rekenperiode was het kleidek op de dijk aanwezig. In Figuur 3.7 is het berekende verloop van de freatische lijn voor 1976 met en zonder kleidek weergegeven.



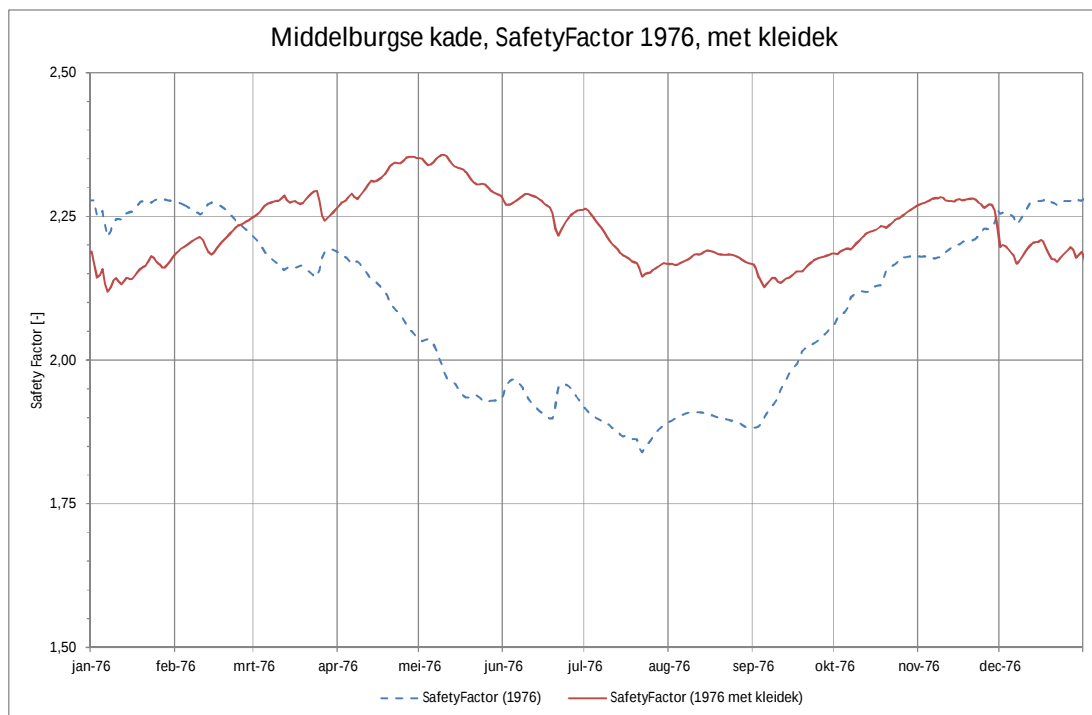
Figuur 3.7 Berekende grondwaterstijghoogten Middelburgse kade (1976) met en zonder toepassing van een kleidek van 0,5 m

Het verloop is voornamelijk lastig te verklaren. In peilfilter M1 is er sprake van een geringe extra verlaging van de freatische lijn, die in de loop van het jaar geleidelijk groter wordt. In oktober lijkt het verschil het grootst en bedraagt gemiddelde 0,06 m. In peilbuis M2 is een vergelijkbaar verloop waarneembaar, waarbij het verschil in het begin van het jaar geringer is. In oktober lijkt het verschil het grootst en bedraagt gemiddelde 0,07 m.

In peilbuis M3 is in het eerste deel van het jaar sprake van een verhoging van de freatische lijn. In juli is er sprake van significante verschillen. Het verschil in de minimale waarde van de freatische lijn bedraagt in juli 0,17 m, waarbij de waarde met kleidek hoger is. In peilbuis M4 is een vergelijkbaar verloop als in M3 zichtbaar, waarbij de verschillen echter geringer zijn. Het verschil in de minimale waarde van de freatische lijn bedraagt in juli 0,05 m, waarbij de waarde met kleidek hoger is. Dat wil zeggen dat de freatische lijn minder is verlaagd.

3.4.3 SafetyFactor

In Figuur 3.8 is de berekende SafetyFactor voor het jaar 1976 met en zonder kleidek weergegeven. Uit de grafiek volgt dat de SafetyFactor voor de situatie met kleidek duidelijk anders verloopt dan de oorspronkelijke situatie. In de maanden januari en februari resulteert het kleidek in een lagere SafetyFactor, waarbij de waarde boven de 2,2 blijft. Vanaf maart tot en met november resulteert het kleidek in een hogere SafetyFactor, waarbij in de maand september de laagste waarde van 2,13 wordt berekend. Dit is significant hoger dan de waarde van 1,85 die in juli wordt berekend zonder kleidek. In december is de SafetyFactor met kleidek lager dan de situatie zonder kleidek. In beide gevallen wordt een waarde boven de 2,0 berekend.



Figuur 3.8 Berekende SafetyFactor Middelburgse kade na toepassing kleidek van 0,5 m (1976)

3.4.4 Discussie

In de modellering heeft een aanbrengen van een kleidek een geringer effect op de freatische lijn dan op voorhand werd verwacht. Het lijkt erop alsof de kleilaag de verdroging tegengaat (immers zonder kleidek neemt de verlaging van de freatische lijn minder af; daarbij lijkt het er ook op dat het kleidek infiltratie bij het weer her-bevochtigen van het veenlichaam tegengaat. Vooralsnog kan niet met zekerheid worden gesteld dat dit een fysieke realiteit is of dat dit een gevolg is van de numerieke schematisatie. Mogelijk heeft de Dupuit benadering, waarbij wordt uitgegaan van een 2-D stroming, een te onnauwkeurige benadering van het effect van het dunne kleidek tot gevolg.

Uit de berekening van de SafetyFactor volgt dat het aanbrengen van het kleidek een significante invloed heeft op de stabiliteit van de kade. In de extreem droge periode resulteert het kleidek in een hogere waarde van de berekende SafetyFactor. De lagere SafetyFactor in wintermaanden is waarschijnlijk een gevolg van de wijze waarop het aanbrengen van het kleidek is gemodelleerd. Dit kleidek is zowel op de kruin als het talud van de kade aangebracht. Het gedeelte op de kruin zorgt in de natte perioden waarschijnlijk voor een extra belasting, waardoor in die periode een lagere SafetyFactor wordt berekend.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

- Het met dgFlow opgezette model voor Middelburgse kade, is gekalibreerd voor de jaren 2004 en 2005. Hierbij is gebruik gemaakt van lokaal grond- en laboratorium-onderzoek, waarbij alle parameters in de kalibratie zijn geoptimaliseerd. Het model is niet geverifieerd voor meer extreme klimatologische omstandigheden of andere bodemlagen (kleidek). De berekende waarden moeten dan ook als indicatief worden beschouwd.
- Uit de berekeningen met de gegevens van het extreem droge jaar 1976 volgt dat de freatische lijn in de kade significant verlaagd in de droge periode. In de kruin blijft de verlaging van de freatische lijn beperkt tot circa 0,25 m. In de voet van de kade is de berekende verlaging van de freatische lijn circa 0,95 m. De verlagingen van de freatische lijn zijn berekend ten opzichte van het als referentie beschouwde kalenderjaar 2005.
- Uit de berekeningen volgt dat er geen directe jaar overstijgende effecten optreden (verandering van freatische lijn of SafetyFactor). Andere effecten, die het gevolg zijn van structurele veranderingen in het veen, kunnen met het gebruikte model niet in beeld worden gebracht.
- Een verlaging van het Boezempeil, al of niet bewust tot stand gebracht, heeft een extra verlaging van de freatische lijn tot gevolg en daarmee een verdere verdroging van de veenkade. Voor de beschouwde kade hoeft het verlagen van het Boezempeil niet direct een negatief effect te hebben op de sterkte van de kade. Doordat de verlaging van het Boezempeil ook resulteert in een verlaging van de belasting op de kade, kan er sprake zijn van een verhoging van de SafetyFactor. Er kan een kritische situatie ontstaan wanneer het waterpeil in de Boezem wordt hersteld. Wanneer de kade dan nog niet vernat is uit andere bron (bijvoorbeeld neerslag), dan zal het herstel van de belasting op de extra droge kade resulteren in een verdere afname van de SafetyFactor. Bij het gekozen scenario in bovenstaande modellering bleek dit niet het geval te zijn. Opgemerkt wordt dat deze conclusie niet direct vertaald kan worden naar andere veenkades, daar de reactie van het systeem afhankelijk is van geometrie, (grond)waterpeilen en bodemparameters.
- Uit de berekeningen met een als mitigerende maatregel toegepaste kleibedekking met 0,5 meter, volgt dat de freatische lijn in een groot deel van het jaar wordt verlaagd. In de extreem droge periode is de verlaging geringer dan zonder kleiafdekking.
- In de modellering heeft het aanbrengen van een kleidek een geringer effect op de freatische lijn dan op voorhand werd verwacht. Het lijkt erop alsof de kleilaag de verdroging tegengaat (immers zonder kleidek neemt de verlaging van de freatische lijn minder af; daarbij lijkt het er ook op dat het kleidek infiltratie bij het weer herbevochtigen van het veenlichaam tegengaat). Vooralsnog kan niet met zekerheid worden gesteld dat dit een fysieke realiteit is of dat dit een gevolg is van de numerieke schematisatie. Mogelijk heeft de Dupuit benadering, waarbij wordt uitgegaan van een 2-D stroming, een te onnauwkeurige benadering van het effect van het dunne kleidek tot gevolg.

- Uit de berekening van de SafetyFactor volgt dat het aanbrengen van het kleidek een significante invloed heeft op de stabiliteit van de kade. In de extreem droge periode resulteert het kleidek in een hogere waarde van de berekende SafetyFactor. De lagere SafetyFactor in wintermaanden is waarschijnlijk een gevolg van de wijze waarop het aanbrengen van het kleidek is gemodelleerd. Dit kleidek is zowel op de kruin als het talud van de kade aangebracht. Het gedeelte op de kruin zorgt in de natte perioden waarschijnlijk voor een extra belasting, waardoor in die periode een lagere SafetyFactor wordt berekend.
- In dgFlow is voor de berekening van de verdamping gebruik gemaakt van de benadering volgens Penmann-Monteith. Deze methode, die meer meteorologische gegevens gebruikt dan de methode Makkink, is met name buiten het groeiseizoen nauwkeuriger in de bepaling van de potentiële verdamping. De gekozen methode in dgFlow is nog niet gevalideerd en de berekende cumulatieve verdamping over het jaar zijn vergeleken met de waarden verkregen met de methode Makkink aanzienlijk hoger. Dit maakt dat de rekenresultaten met de nodige voorzichtigheid beoordeeld dienen te worden. In de berekening is bijvoorbeeld geen rekening gehouden met het type begroeiing van de kade.

4.2 Aanbevelingen

- Het verdient aanbeveling de uitgevoerde modellering te herhalen voor andere gemonitorde veenkaden, zoals bijvoorbeeld de Veenderij of de locaties bij Delfland, om meer inzicht te krijgen in de invloed van de geometrie en locatie specifieke omstandigheden op de verlaging van de freatische lijn in extreem droge omstandigheden.
- Het verdient aanbeveling de toe te passen methode voor de bepaling van de verdamping nader te beschouwen. Voor de berekening van de verdamping in onderhavig studie is gebruik gemaakt van de methode Penman-Monteith. De implementatie in dgFlow geeft een aanzienlijk hogere verdamping dan wanneer gebruik gemaakt zou worden van de methode Makkink.
- In onderhavig modellering is als omgevingseffect het tijdelijk verlagen van het Boezempeil over een specifieke periode beschouwd. Het verdient aanbeveling de analyse van omgevingseffecten uit te breiden, waarbij bijvoorbeeld ook wordt gekeken naar een verandering van het polderpeil of een combinatie van veranderingen. Een verhoging van het boezempeil in het kader van de aanvoer van water lijkt voor de beschouwde Middelburgse kade ongunstiger dan de nu gemodelleerde peilverlaging.

5 Referenties

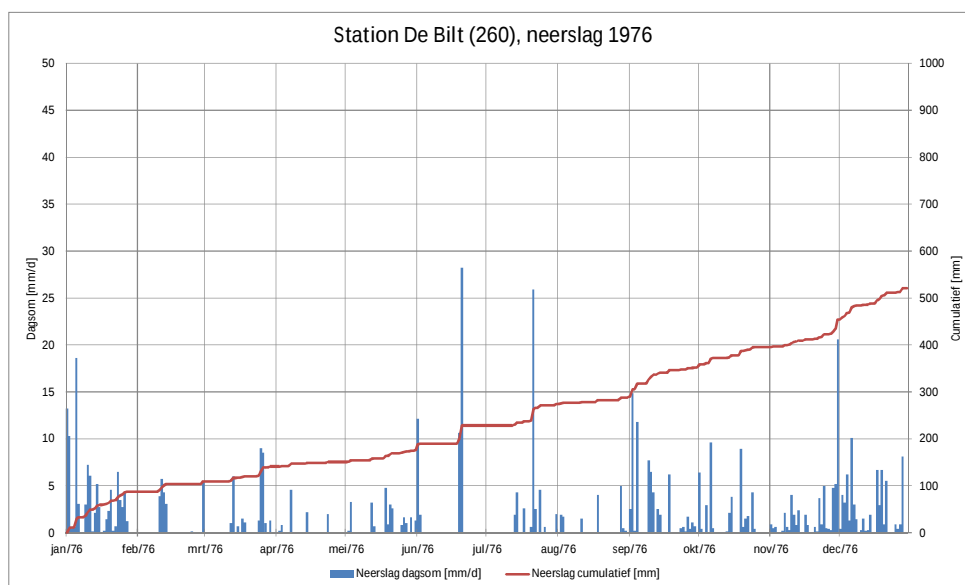
- [1] Deltares (2012), 'Monitoring droogteonderzoek veenkaden; eindrapportage', Deltares rapport 1203255-006-GEO-0001, 19 december 2012, Delft.
- [2] Deltares (2012), 'Impact of climate change on engineered slopes for infrastructure; computer model', Deltares rapport 1201351-008, 25 april 2012, Delft.

A Meteorologische gegevens

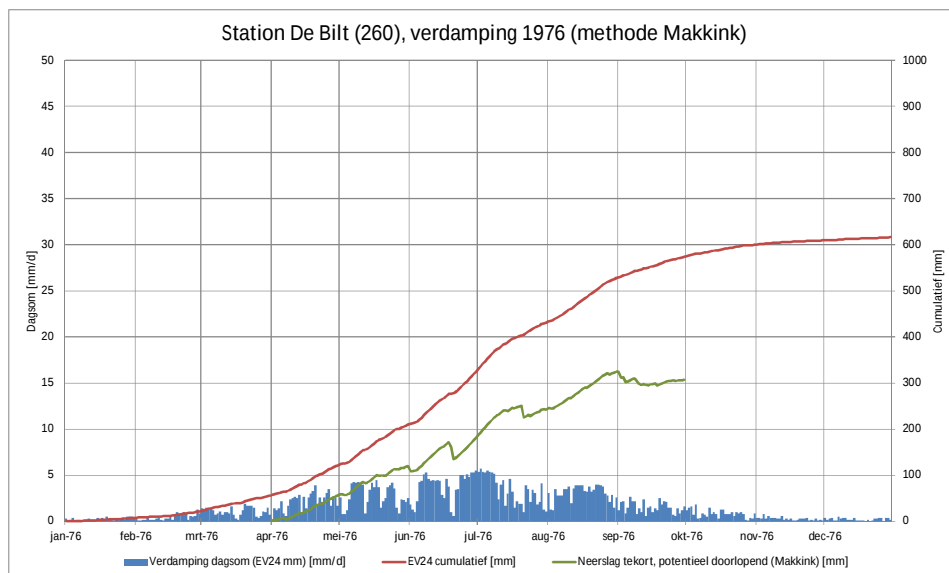
A.1 Kalenderjaar 1976

Het jaar 1976 wordt gekenmerkt als een extreem droog jaar. In dit jaar is het hoogste neerslag te kort geregistreerd. Voor locatie de Bilt (station 260, bron berekend uit tabel met dagwaarden 1976) bedroeg dit jaar:

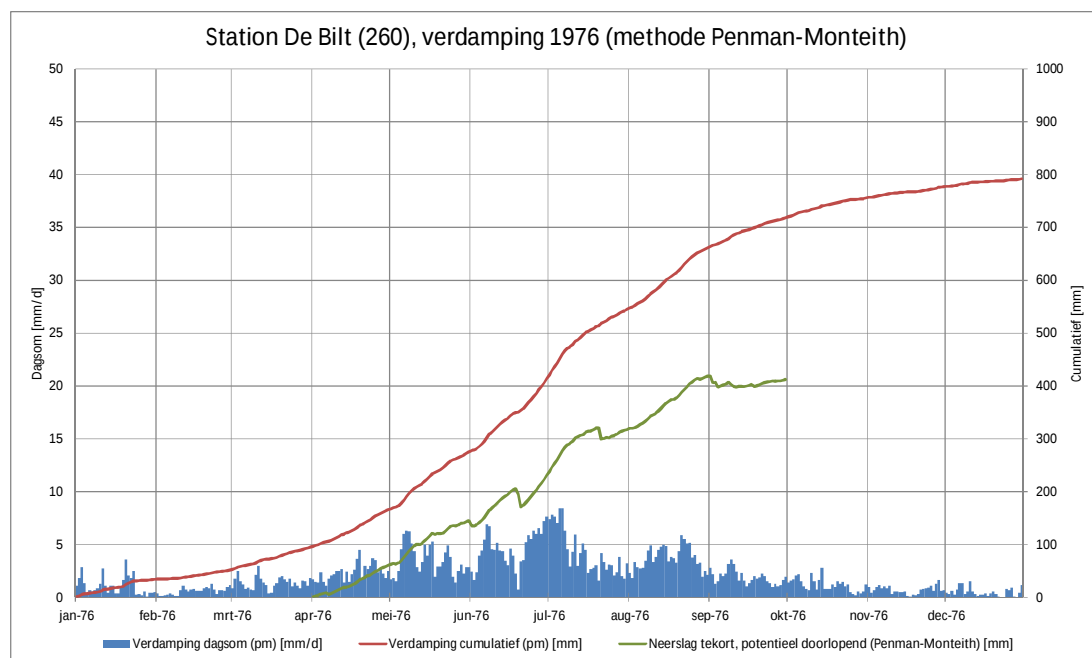
- Neerslag 523,1 mm
- Referentie gewasverdamping (mm) 616,3 mm
- Neerslag tekort per 30-september 307,3 mm



Figuur A.1 Meteorologische gegevens station De Bilt: neerslag in 1976



Figuur A.2 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 1976 (Makkink)



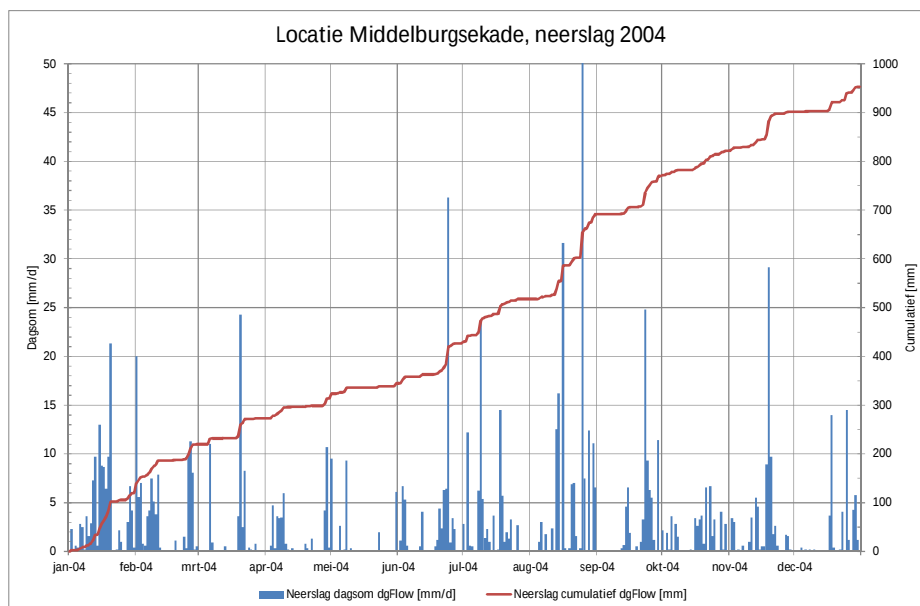
Figuur A.3 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 1976 (Penman-Monteith)

A.2 Kalenderjaar 2004

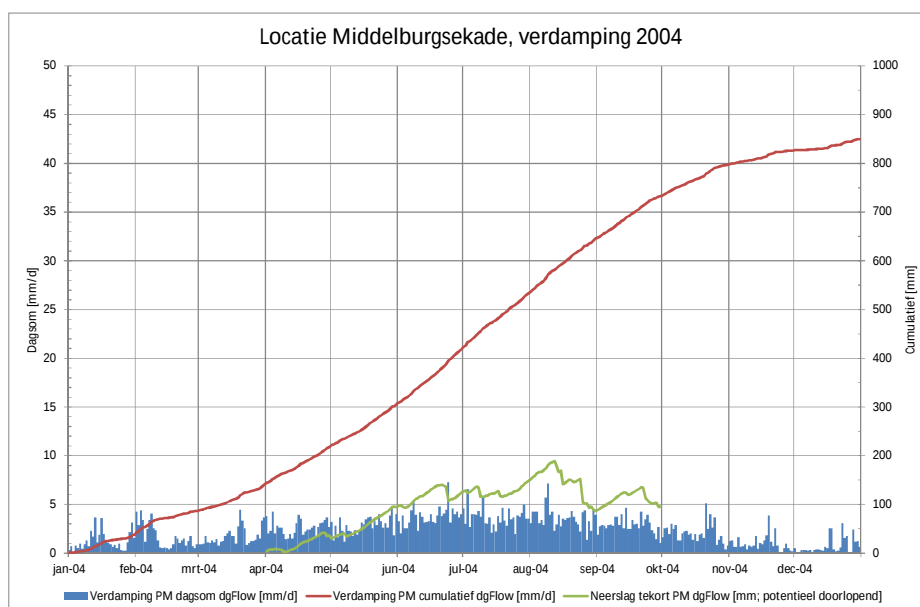
In alle maanden, met uitzondering van mei, juli en december, lag de gemiddelde temperatuur boven normaal. Gemiddeld over het land viel in 2004 862 mm neerslag, terwijl het langjarig gemiddelde 799 mm bedraagt. Daarmee kan het jaar als vrij nat worden gekarakteriseerd.

Voor de Bilt bedroeg dit jaar (tussen haakjes Rotterdam):

- Neerslag 910,4 mm (916,2)
- Referentie gewasverdamping (mm) 586,8 mm (584,9 mm)
- Neerslag tekort (mm) per 30-september -23 mm (-)
- Neerslag tekort (dgFlow) per 30-september 96 mm (Penmann-Monteith)



Figuur A.4 Meteorologische gegevens station De Bilt: neerslag in 2004

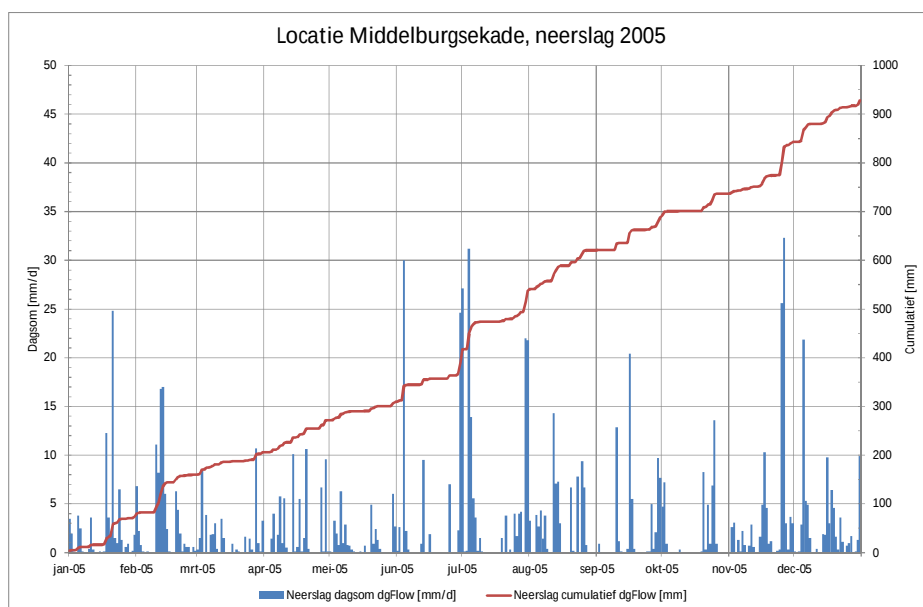


Figuur A.5 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 2004 (Penmann-Monteith)

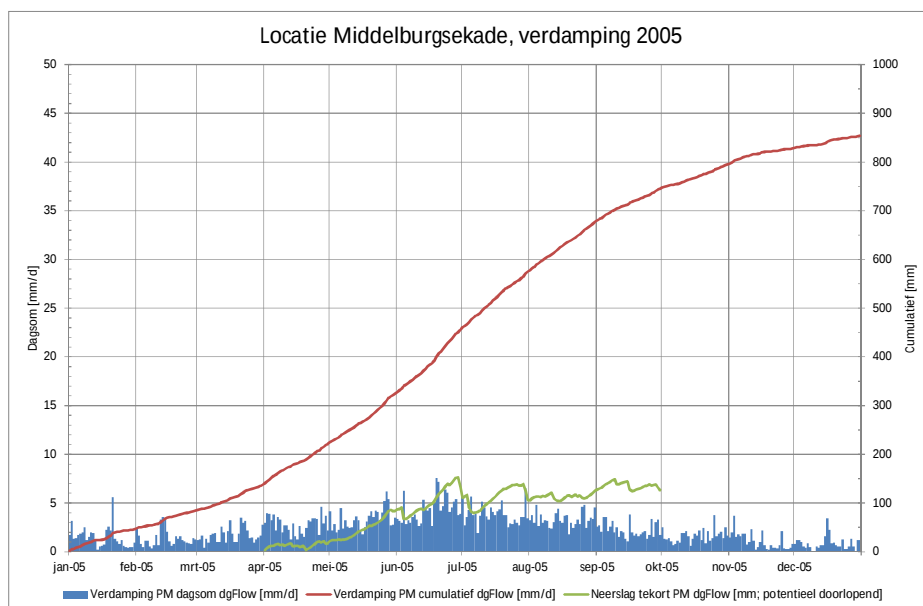
A.3 Kalenderjaar 2005

Met een gemiddelde temperatuur in De Bilt van 10,7 °C tegen een langjarig gemiddelde van 9,8 °C was 2005 zeer warm. Verder was het jaar zeer zonnig met een normale hoeveelheid neerslag. Voor de Bilt bedroeg dit jaar (tussen haakjes Rotterdam):

- Neerslag 942,6 mm (971,6)
- Referentie gewasverdamping (mm) 591,2 mm (605,6 mm)
- Neerslag tekort per 30-september 9 mm (-)
- Neerslag tekort (dgFlow) per 30-september 125,9 mm (Penmann-Monteith)



Figuur A.6 Meteorologische gegevens station De Bilt: neerslag in 2005

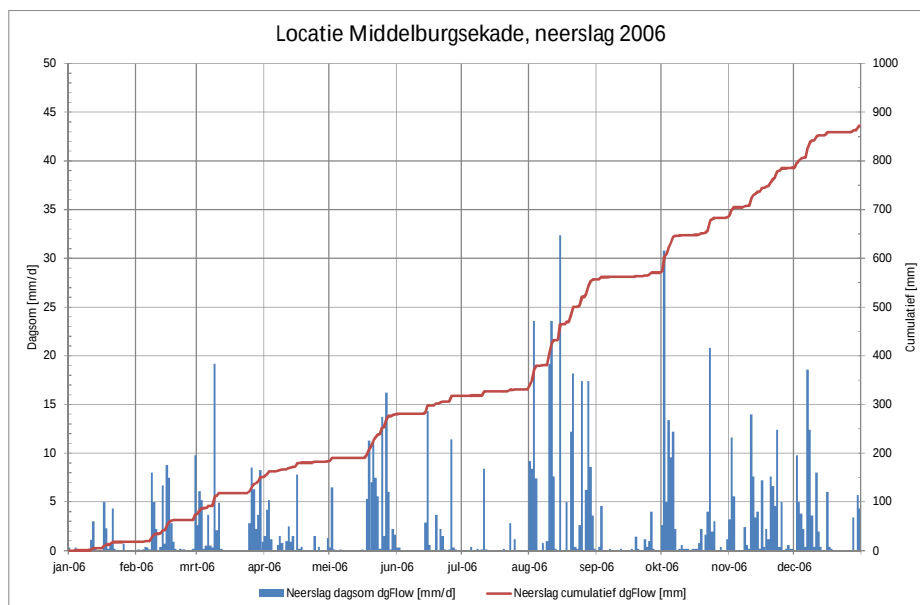


Figuur A.7 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 2005 (Penmann-Monteith)

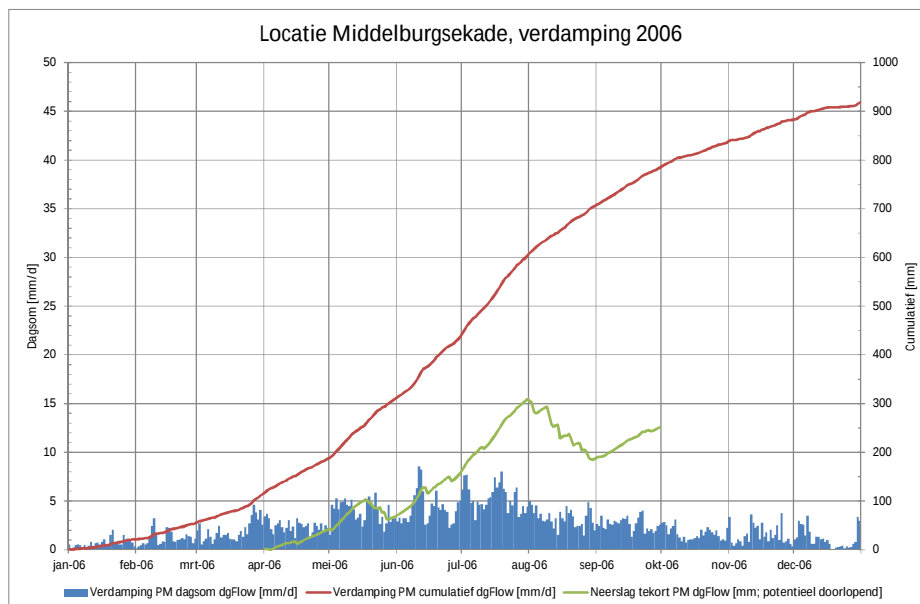
A.4 Kalenderjaar 2006

Record warm, zeer zonnig en vrijwel de normale hoeveelheid neerslag. Voor locatie de Bilt (station 260, bron Jaaroverzicht neerslag en verdamping in Nederland, 2006) bedroeg dit jaar (tussen haakjes station 344/473: Rotterdam):

- Neerslag 866,8 mm (1013,9)
- Referentie gewasverdamping (MM) 600,5 mm (621,4 mm)
- Neerslag tekort per 30-september -147 mm (-)
- Neerslag tekort (dgFlow) per 30-september 251,8 mm (Penmann-Monteith)



Figuur A.8 Meteorologische gegevens station De Bilt: neerslag in 2006



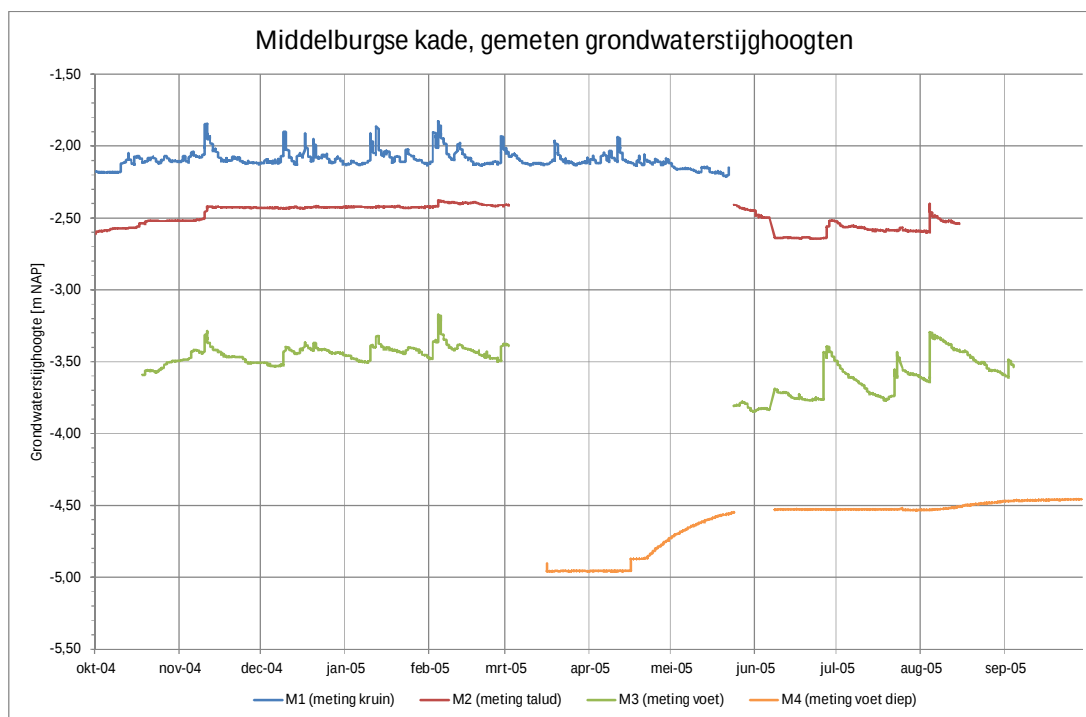
Figuur A.9 Meteorologische gegevens station De Bilt: verdamping in 2006 (Penmann-Monteith)

B Grondwaterstijghoogten

B.1 Monitoring Middelburgse kade 2004-2005

In de Middelburgse kade zijn 4 peilfilters afgesteld, waarin met behulp van divers de waterstand is gemeten. De meetperiode besloeg circa 1 jaar, van oktober 2004 tot oktober 2005. Hierbij dient opgemerkt te worden dat

- de peilbuis in de kruin (M1) is waargenomen tot juni 2005,
- de peilbuis in de voet (M2) en in het talud (M3) in de maanden april en mei 2005 geen waarden hebben geregistreerd.
- De peilbuis diep in de voet (M4) later is geplaatst.

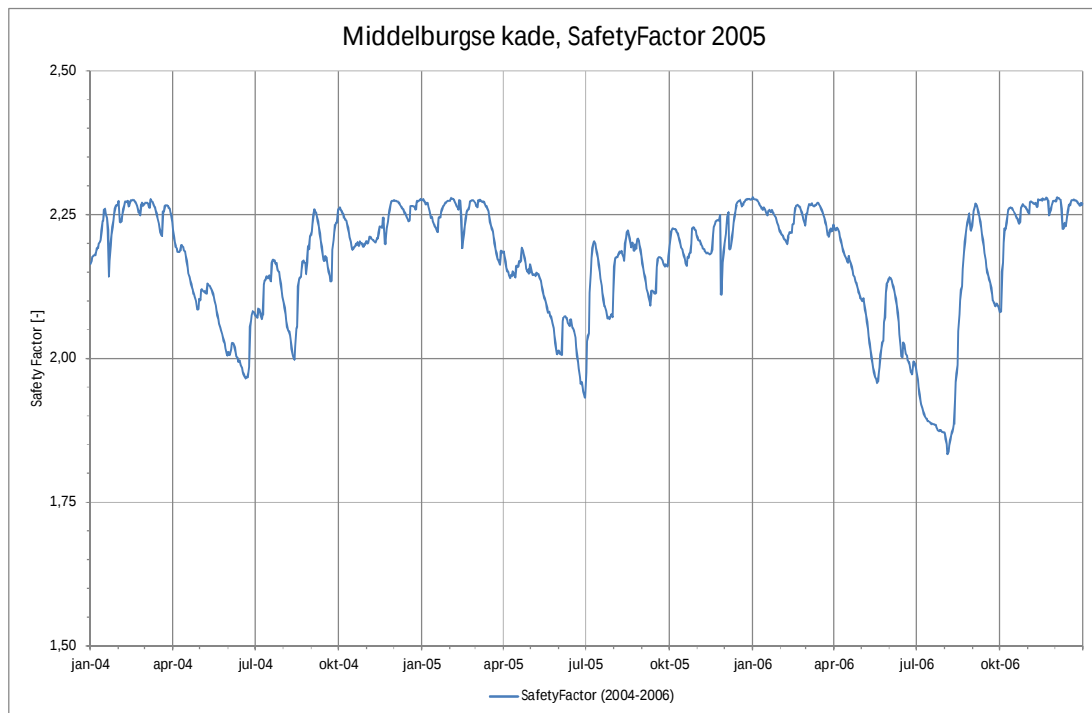


Figuur B.1 Gemeten grondwaterstijghoogten Brusselse kade, peilfilters M1 t/m M4 (2004-2005)

C SafetyFactoren

C.1 Kalibratieperiode 2004-2006

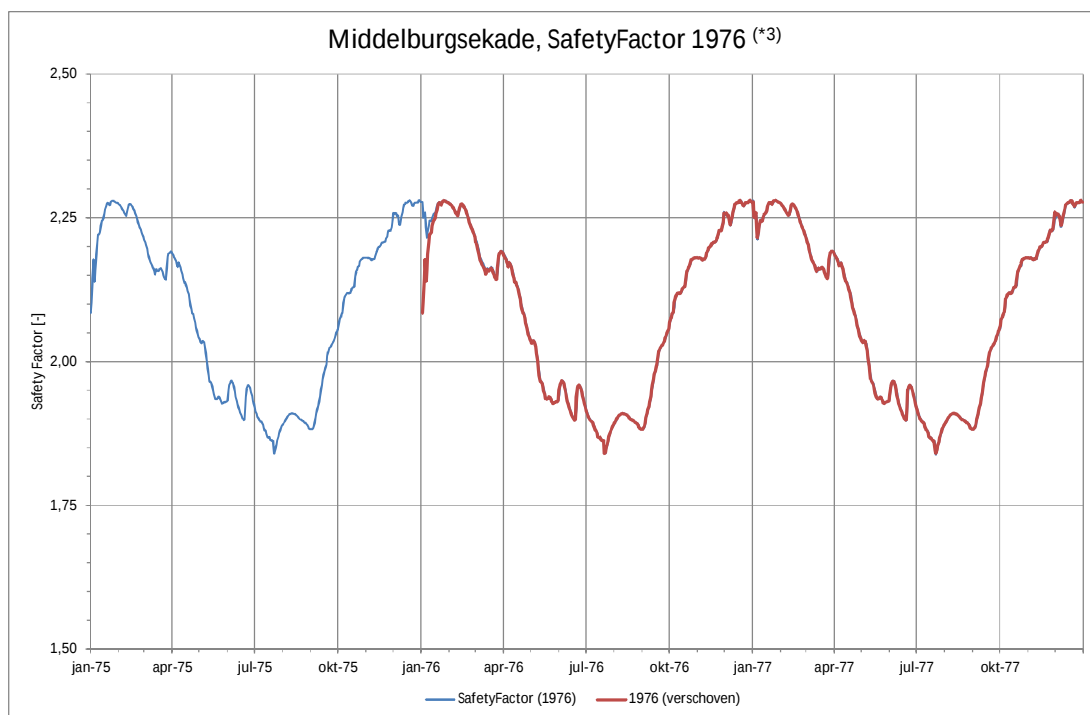
In Figuur C.1 is SafetyFactor welke met het gekalibreerde model voor de kalibratieperiode is berekend weergegeven. De metingen zijn gestart in oktober 2004 en beëindigd in oktober 2005. De waarden na oktober 2005 betreffen een voorspelling. De weergave in de figuur betreft een tijdsspanne van 3 jaar.



Figuur C.1 Berekende SafetyFactor voor de kalibratie periode 2004-2006 met het gekalibreerde model

C.2 Extreem droge periode 1976

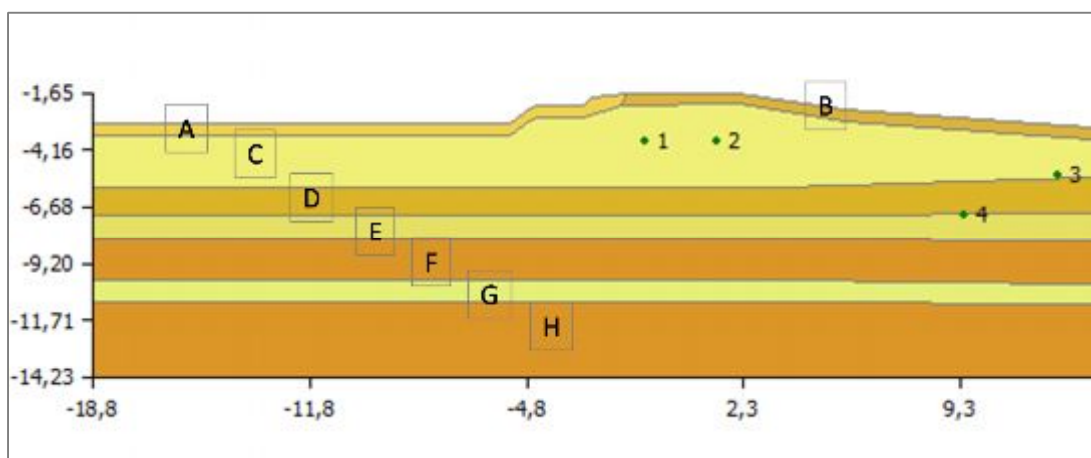
Voor de extreem droge periode 1976 is een berekening uitgevoerd voor 3 achtereenvolgende jaren, waarbij voor elk jaar de meteorologische gegevens van 1976 als randvoorwaarde zijn opgelegd. Deze werkwijze is gevolgd om eventuele effecten van initialisatie (het opstarten van het model) of effecten van droogte die over meerdere jaren hun effecten doen gelden te kunnen achterhalen. Zoals uit Figuur C.2 blijkt is er in de eerste maand wel een opstart effect zichtbaar. De initiële waarde van de SafetyFactor uit een stationaire berekening ligt iets lager. Er zijn in de grafiek geen jaargrens overschrijdende effecten waar te nemen.



Figuur C.2 SafetyFactor 1975-1977, met verschuiving ter beoordeling (initialisatie en meerjarig effect)

D Bodemparameters

Voor de Middelburgse kade is de bodemopbouw conform Figuur D.1 gehanteerd. De in de modellering gebruikte bodemparameters, na kalibratie, zijn samengevat in Tabel D.1. Voor de mitigerende maatregel van het toepassen van een kleidek is laag B vervangen door een kleidek, zoals met eigenschappen zoals weergegeven in Tabel D.2.



Figuur D.1 Bodemopbouw en bodemparameters dwarsprofiel Middelburgse kade

Laag	Omschrijving	Soortelijk Gewicht (Nat) [kN/m ³]	Soortelijk Gewicht (Droog) [kN/m ³]	mv [m ² /kN]	phi [°]	C [kN/m ²]	K _h [m/d]	K _v [m/d]
A	Boezem	11	6,0	0	12	2	0,4	0,4
B	Talud	11	6,0	0	12	2	0,4	0,4
C	Veen 1	11	6,0	0	12	2	0,2	0,2
D	Veen 2	10	10	0	20	8	0,005	0,005
E	Veen 3	11	11	1*10 ⁻⁴	12	3	0,2	0,2
F	Veen 4	10	10	1*10 ⁻⁴	20	8	0,5	0,5
G	Veen 5	11	11	1*10 ⁻⁴	12	3	0,5	0,5
H	Zand	20	17	0	30	0	2,0	2,0

Tabel D.1 Bodemparameters model Middelburgse kade na kalibratie

De sterkte parameters gebruikt voor deze case zijn afgeleid ten behoeve van een eerder uitgevoerd onderzoek op basis van met name vane testen en andere eenvoudig uit te voeren testen. De sterkte is uitgedrukt als een gedraineerde c- en phi-relatie. Hieruit volgen voor de veenlagen 3 sets van parameters. Voor de veenlagen aan de top van het pakket (op de grens van de verzadigde zone) is een cohesie van 2 kPa en een hoek van inwendige wrijving van 12 graden gehanteerd voor de wat diepere veenlagen is een cohesie van 8 en een hoek van inwendige wrijving van 20 graden gehanteerd. In de diepere veenlagen is een cohesie van 3 kPa en een phi van 12 graden gehanteerd.

In de veensoorten met een hoek van inwendige wrijving van 12 graden en een cohesie van 2 tot 3 zal de invloed van een verandering van effectieve spanning als gevolg van het lichter worden van het veen en de fluctuaties van de waterstand op de totaal te mobiliseren schuifsterkte niet zo groot zijn. De cohesie zal hier dominant zijn en die is spanningsonafhankelijk. De invloed op de stabiliteit van de veranderingen van de waterstand wordt daarmee hoofdzakelijk veroorzaakt door de verandering in aandrijvend moment. Wanneer een hogere hoek van inwendige wrijving in het veen aanwezig is (stel 17 graden) met een lagere cohesie (stel 1 kpa) dan wordt een andere relatie gevonden tussen fluctuaties van de freatische lijn en de SafetyFactor. De tendens van de in deze case aangetoonde relaties tussen SafetyFactor en grondwaterdrukken is daarmee juist, maar kan in andere situatie (andere parameters voor het veen) afwijken (meer invloed veranderingen van de effectieve spanning).

Laag	Omschrijving	Soortelijk Gewicht (Nat) [kN/m ³]	Soortelijk Gewicht (Droog) [kN/m ³]	mv [m ² /kN]	phi [°]	C [kN/m ²]	K _h [m/d]	K _v [m/d]
B	Kleidek	13	13	0	20	8	0,05	0,05

Tabel D.2 Aangenomen eigenschappen kleiafdekking