

# Notitie

Auteur: Kees van Immerzeel  
Projectnummer: sweco.projectId  
Onderwerp: sweco.name  
Klant: sweco.mainCustomer.name  
Projectleider: sweco.projectManager.firstName  
sweco.projectManager.lastName

## Verantwoording

**Titel:** Notitie koppelkansen natuurwaarden bij horizontale pipingmaatregelen in de Lunenburgerwaard

**Onderwerp:** Natuurontwikkeling op een horizontale pipingmaatregel

**Projectnummer:** 51006448/3010

**Klant:** Combinatie Lek Ensemble VOF

**Referentienummer:**

**Versie:** 1.0

**Datum:** 14-7-2022

**Auteur:** Kees van Immerzeel / Evalyne de Swart

**E-mailadres:** [Kees.vanimmerzeel@sweco.nl](mailto:Kees.vanimmerzeel@sweco.nl) / [Evalynedeswart@sweco.nl](mailto:Evalynedeswart@sweco.nl)

**Gecontroleerd door:** Ron Buitelaar

**Paraaf gecontroleerd:**

---

**Vrijgegeven door:** Ron Buitelaar

**Paraaf vrijgegeven:**

---

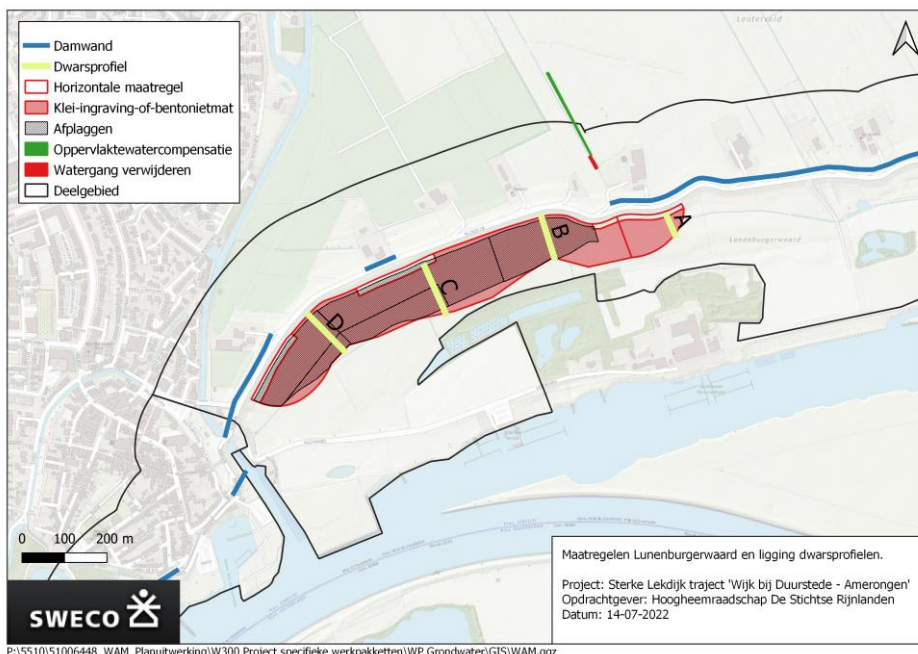
**Document referentie:**

# 1 Inleiding

In het kader van het dijkversterkingsproject *Sterke Lekdijk, traject Wijk bij Duurstede Amerongen*, wordt de toepassing van een bentonietmat of een kleiinkassing overwogen als horizontale pipingmaatregel in het deelgebied Lunenburgerwaard (figuur 1). Een bentonietmat bestaat uit een dunne laag zeer slecht doorlatende klei. Deze maatregel wordt langs het dijktraject gecombineerd met andere maatregelen, zoals de plaatsing van damwanden.

In dit memo wordt steeds gesproken over een bentonietmat als horizontale pipingmaatregel; de analyse geldt echter ook voor een klei-inkassing met dezelfde diepteligging.

Primair is de functie van een bentonietmat het voorkomen van piping. Dat is de geconcentreerde stroming van grondwater onder dijken en kades. Piping is ongewenst omdat dit proces de stabiliteit van een dijk kan ondermijnen.



Figuur 1: Maatregelen in het deelgebied Lunenburgerwaard (Basis scenario).

In het project *Sterke Lekdijk, traject Wijk bij Duurstede Amerongen* wordt ernaar gestreefd om, waar mogelijk, kansen te benutten die ontstaan door de dijkversterking. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat dijkversterking tevens natuurwaarden kan versterken. Daarom wordt bijvoorbeeld, ten behoeve van natuurontwikkeling, afplaggen als maatregel overwogen.

Deze memo beschrijft de meekoppelkansen voor natuurwaarden bij de toepassing van een bentonietmat. De verwachting is namelijk dat deze matten - doordat ze relatief ondiep in het bodemprofiel worden aangebracht- leiden tot relatief natte omstandigheden, wat gunstig kan zijn voor natte natuurdoeltypen.

Het grondwaterregime en de daarmee samenhangende vochttoestand van de bodem is dan ook belangrijk bij de bepaling van de meekoppelkansen voor natuurwaarden.

Hoofdstuk 2 (Werkwijze) beschrijft de manier waarop het te verwachten grondwaterregime en de vochttoestand van de bodem boven de bentonietmat is

bepaald. Daarbij is uitgegaan van vier representatieve dwarsprofielen in de Lunenburgerwaard. De locaties van de dwarsprofielen zijn weergegeven in figuur 1.

Paragraaf 3.1 beschrijft de resultaten van deze werkwijze, op basis waarvan in paragraaf 3.2 de meekoppelkansen voor natuurwaarden in de Lunenburgerwaard worden beschreven.

Het vierde hoofdstuk bevat de conclusies van de bovenstaande analyse. Het vijfde hoofdstuk tenslotte bevat de literatuur verwijzingen.

Bijlage 1 beschrijft het gereedschap (een waterbalansmodel) waarmee de analyses zijn uitgevoerd.

## 2 Werkwijze

Om te bepalen welk grondwaterregime c.q. welke vochttoestand van de bodem te verwachten is op de plaatsten waar de bentonietmat worden toegepast, is een waterbalans model gemaakt van de bodem boven deze matten. Het gaat om een zgn. puntmodel.

De volgende uitgangspunten zijn daarbij gehanteerd:

- De bentonietmat worden aangebracht op een diepte van 80 cm-mv, waarbij de onderste 30 cm bestaat uit schoon zand, waarop een laag van 50 cm van het oorspronkelijke bodemmateriaal wordt teruggeplaatst.
- De waterbalans in een dwarsprofiel (figuur 1) wordt beschreven door een puntmodel.

Bijlage 1 beschrijft de werking van het waterbalans model en gaat daarnaast in op de parametrisering van dit model op de vier dwarsprofiel locaties.

Dit hoofdstuk beschrijft de aspecten die meest bepalend zijn voor het grondwaterregime en vochttoestand van de bodem boven de bentonietmat.

Het gaat om:

- de *ligging* van de mat (in- of onder de deklaag)
- de *hoogteligging* van de mat (ten opzichte van de grondwaterstanden in de omgeving)
- de *breedte* van de mat.

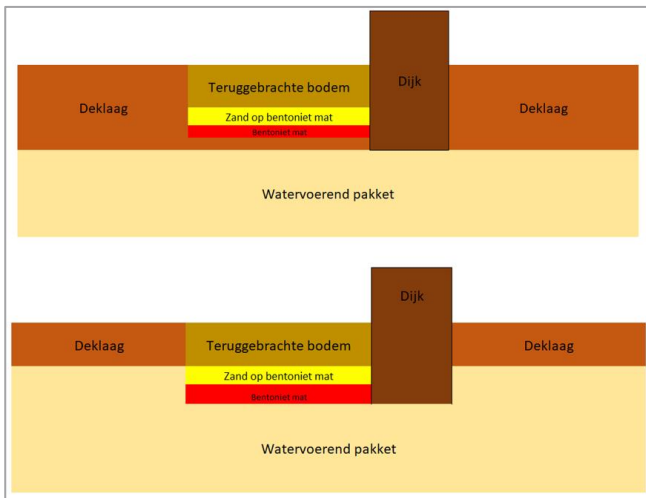
### Ligging in- of onder de deklaag

Een bentonietmat vertegenwoordigt in het bodemprofiel een sterk storende laag. De hydraulische weerstand van de mat is zodanig hoog (>8000 dagen<sup>1</sup>), dat de mat bijna ondoorlatend is. Figuur 2 toont schematisch de ligging van een bentonietmat ten opzichte van de deklaag, de dijk en het watervoerend pakket.

Omdat de bentonietmat bij benadering ondoorlatend is, is er in de modellering vanuit gegaan dat er geen (verticale) stroming door deze mat mogelijk is tussen het watervoerend pakket en de zand c.q. bodemlaag op de mat.

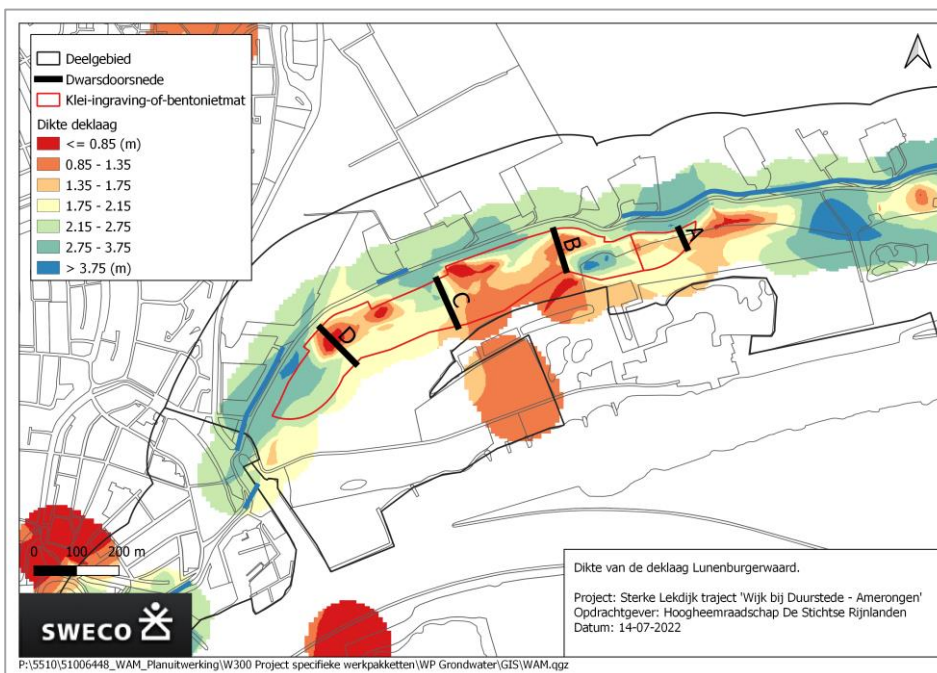
---

<sup>1</sup> Factsheet Innovatie – Bentonietmat, 10-5-2021.



Figuur 2: Schematische weergave van de ligging van een bentonietmat ten opzichte van de deklaag, de dijk en het watervoerend pakket. Boven: ligging in de deklaag. Onder: ligging onder de deklaag.

De deklaag bestaat in het studiegebied vooral uit zandige klei (B-Ware, 2021). De dikte van de deklaag is wisselend (figuur 3), waardoor de bentonietlaag soms in de deklaag ligt en soms in het watervoerend pakket eronder.



Figuur 3: Dikte van de deklaag beneden 80 cm-mv nabij de Hank (Bovenpolder). Bron: (B-Ware, 2021).

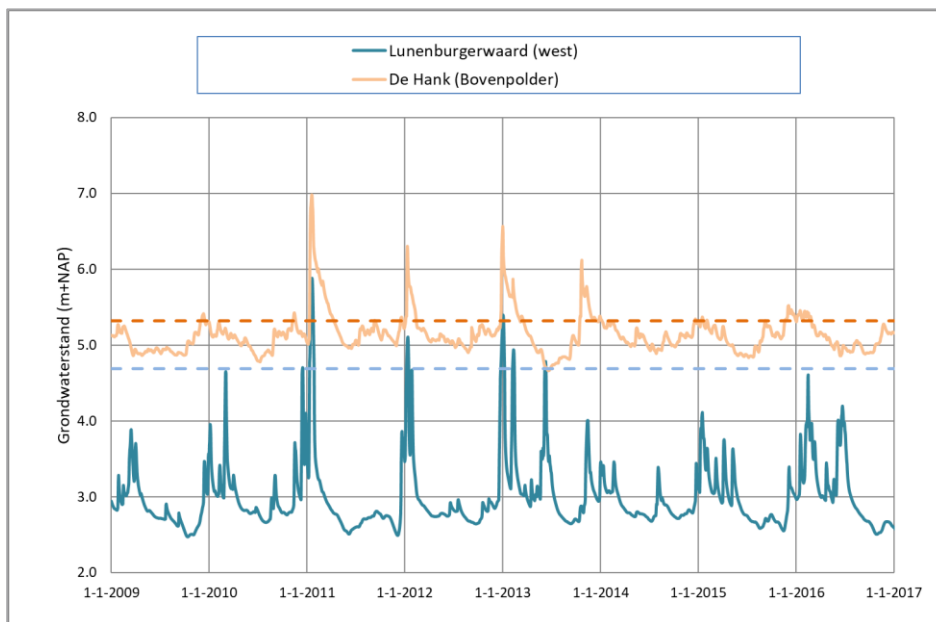
De doorlatendheid van de deklaag is gering in vergelijking met het zand op de bentonietmat. De ontwatering van de bodem boven de bentonietmat vindt daarom vooral plaats door middel van de 30 cm dikke zandlaag op de bentonietmat. Daarnaast kan water uit het profiel worden afgevoerd door stroming over het maaiveld.

Het zal duidelijk zijn dat de ontwatering via de zandlaag op de bentonietmat relatief moeilijk is als deze laag is ingesloten in de deklaag (figuur 2, boven).

Omgekeerd, als de zandlaag onder de deklaag ligt is de ontwatering van de bodem boven de bentonietmat via deze zandlaag relatief makkelijk (figuur 2, onder).

### De hoogteligging

De grondwaterstanden in de omgeving van de bentonietmat bepalen het niveau waarop de bentonietmat kan afwateren. Deze grondwaterstanden kennen een jaarlijkse dynamiek. De grondwaterstanden zijn verder afhankelijk van de locatie in het ca. 10 km lange dijktraject in het project. Ter illustratie toont figuur 4 het verloop van de grondwaterstand (m+NAP) ter plaatse van de Lunenburgerwaard (west) en De Hank (Bovenpolder).



Figuur 4: Verloop van de grondwaterstand (m+NAP) t.p.v. de Lunenburgerwaard (west) en De Hank (Bovenpolder)<sup>2</sup>.

### De breedte van de bentonietmat

Zoals gezegd, de ontwatering van de bodem boven de bentonietmat vindt, afgezien van stroming over het maaiveld en eventuele greppels, vooral plaats door middel van de zandlaag op de bentonietmat. Dit kan echter alleen plaatsvinden aan de kant van de uiterwaard, omdat de zandlaag eindigt bij de dijk.

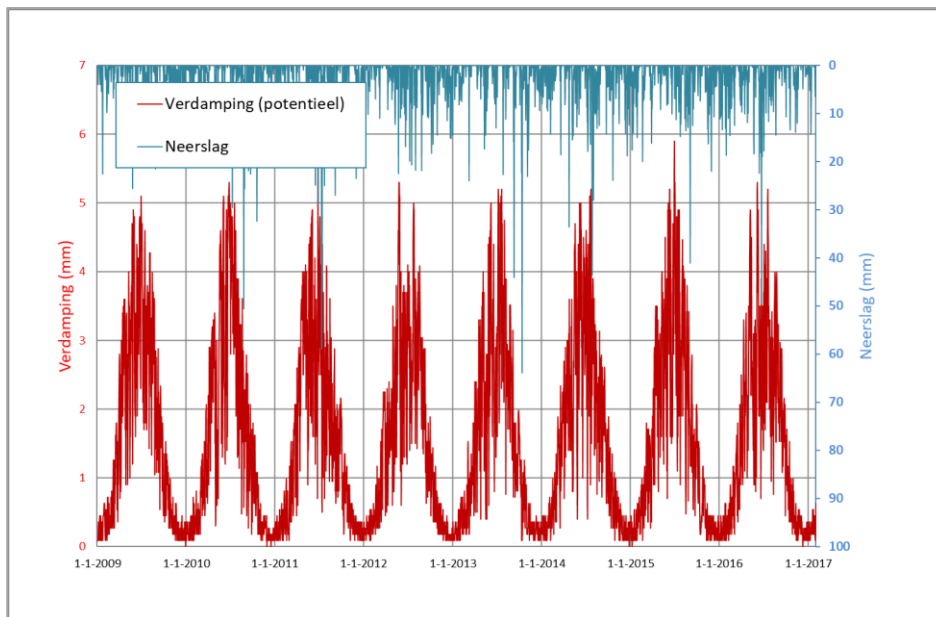
De ontwatering via de zandlaag is dus 1-zijdig, via een denkbeeldige sloot aan de polderzijde. De (denkbeeldige) slootafstand is in de modellering daarom gelijk aan twee maal de breedte van de bentonietmat. De sloot heeft een peil gelijk aan de grondwaterstand in de omgeving. Het zal duidelijk zijn dat, naarmate de bentonietmat breder is, de ontwatering via de zandlaag moeilijker is omdat de slootafstand groter is.

Het is denkbaar dat in de zone in de uiterwaard die grenst aan de bentonietmat de grondwaterstanden worden beïnvloed door het water dat via de zandlaag afstroomt. Vooralsnog is echter aangenomen dat er van een dergelijke beïnvloeding geen sprake is.

<sup>2</sup> Bron: 3D Grondwater modellering WAM (2021).

### Modelberekeningen

In het volgend hoofdstuk worden de berekeningsresultaten getoond die betrekking hebben op vier dwarsprofielen op de bentonietmat in de Lunenburgerwaard (figuur 1). De berekeningen hebben betrekking op een historische periode (2009-2017). Figuur 5 toont de neerslag en verdamping in die periode. Voor de leesbaarheid van de figuren worden in het volgende hoofdstuk alleen de resultaten getoond van de periode 2014-2017.



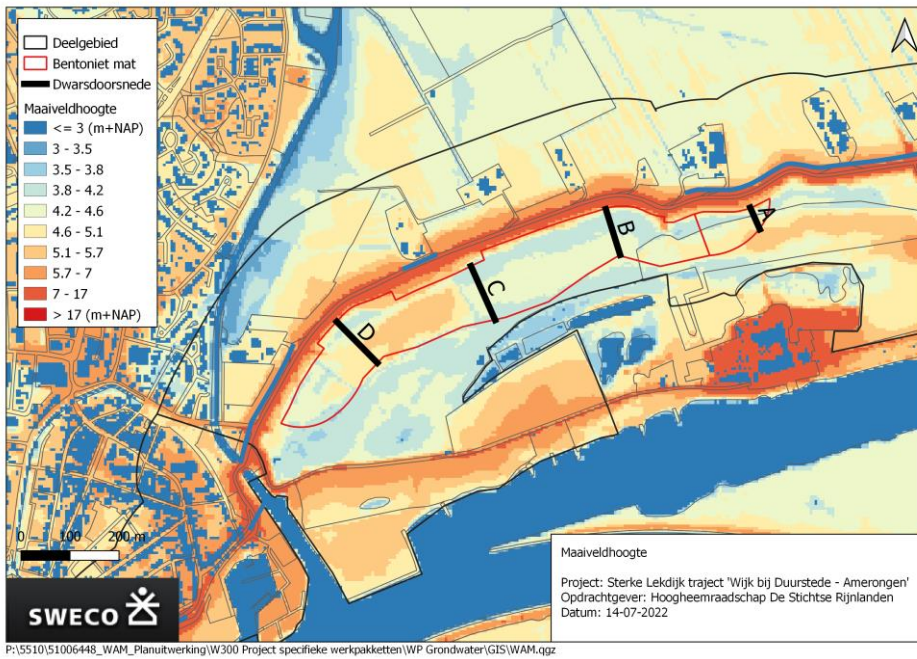
Figuur 5: Neerslag en verdamping (potentieel). Station 260 (de Bilt).

Als basis voor de berekeningen op de vier dwarsprofiel locaties zijn de parameters gebruikt uit tabel 1.

Tabel 1: Parameters ter plaatse van de dwarsprofielen A t/m D. Figuur 1 toont de locaties van de dwarsprofielen. De restdikte is de dikte van de deklaag onder de bentonietmat.

Dwarsprofiel	Maaiveldhoogte (m+NAP)	Afplaggen (m)	Breedte mat (m)	Dikte deklaag (m)	Restdikte (m)
A	4.70	0.00	50	1.65	0.85
B	4.25	0.30	98	1.00	0.00
C	4.25	0.30	121	2.00	0.90
D	5.00	0.30	115	0.60	0.00

Uit tabel 1 blijkt dat voor de modellering in ieder dwarsprofiel een representatieve maaiveldhoogte is gebruikt. Dit is een vereenvoudiging van de werkelijke situatie. Ter vergelijking toont figuur 6 de maaiveldhoogte en de ligging van de dwarsprofielen.



Figuur 6: Maaiveldhoogte. Bron: AHN.



## 3 Resultaten

### 3.1 Modelresultaten

#### 3.1.1 Grondwaterregime

De figuren 7 tot en met 10 tonen de berekende grondwaterstanden in de profielen A t/m D (blauwe lijnen)<sup>3</sup>. Zichtbaar is dat de berekende grondwaterstand in de dwarsprofielen A en C jaarrond op of net onder het maaiveld staat. In de dwarsprofielen B en D kan de grondwaterstand tijdelijk op of net onder het maaiveld komen maar de grondwaterstand zakt met name in de zomer tot op het niveau van de bentonietmat (80 cm-mv).

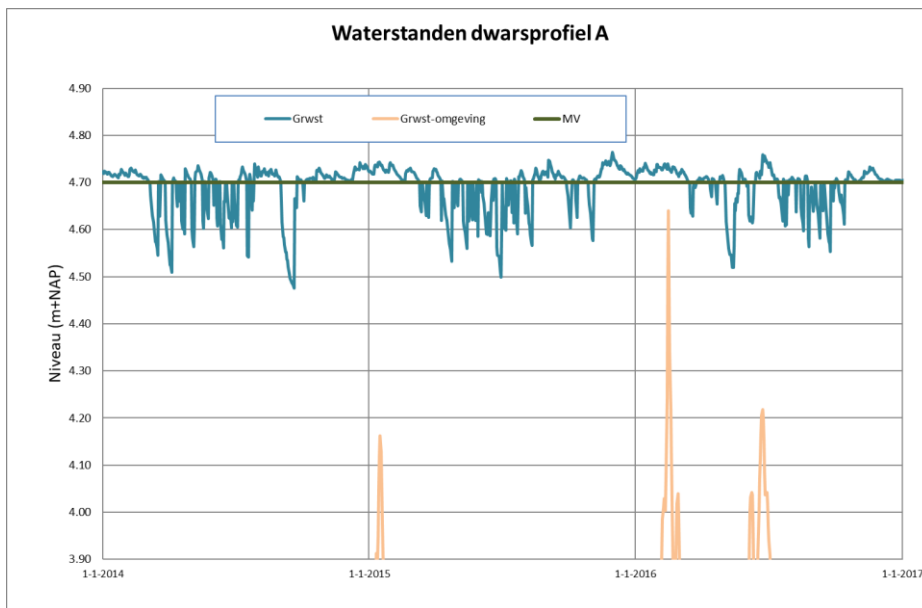
In deze laatste profielen (B en D) ligt de bentonietmat onder de deklaag (vergelijk de situatie in figuur 2 onder), terwijl in de profielen A en C de bentonietmat in de deklaag ligt.

De ligging van de bentonietmat onder de deklaag (profielen B en D) leidt ertoe dat de 30 cm dikke zandlaag boven de mat beter contact maakt met het watervoerend pakket. Daardoor, en door de lage waterstanden in de omgeving, is de ontwatering van het bodemprofiel boven de bentonietmat relatief goed. Dat leidt tot uitzakkende grondwaterstanden in het bodemprofiel boven de bentonietmat.

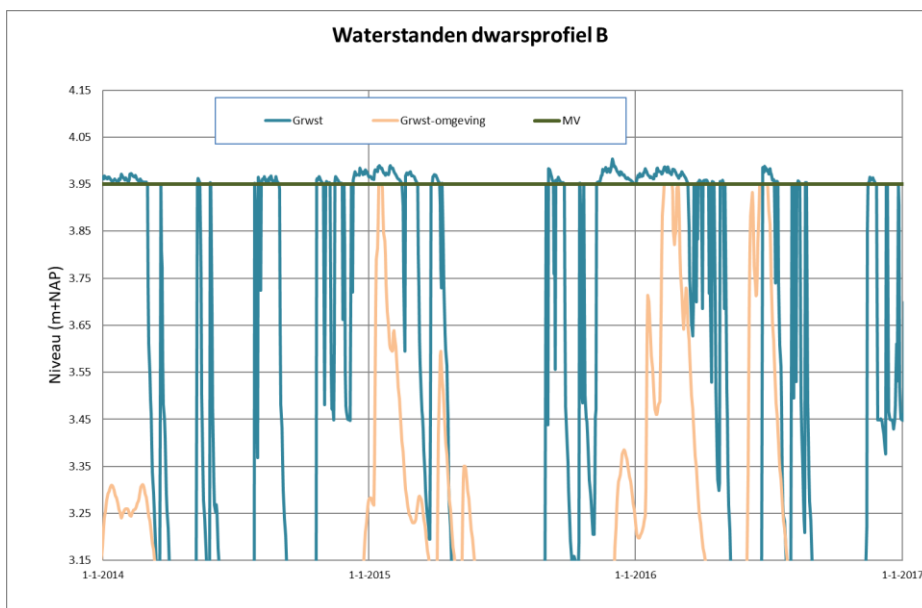
Omgekeerd: De ligging van de bentonietmat boven de deklaag (profielen A en C) leidt ertoe dat de 30 cm dikke zandlaag boven de mat slecht contact maakt met het watervoerend pakket. Daardoor is de ontwatering van het bodemprofiel boven de bentonietmat relatief slecht. Dat leidt tot stagnerend grondwater in het bodemprofiel boven de bentonietmat.

---

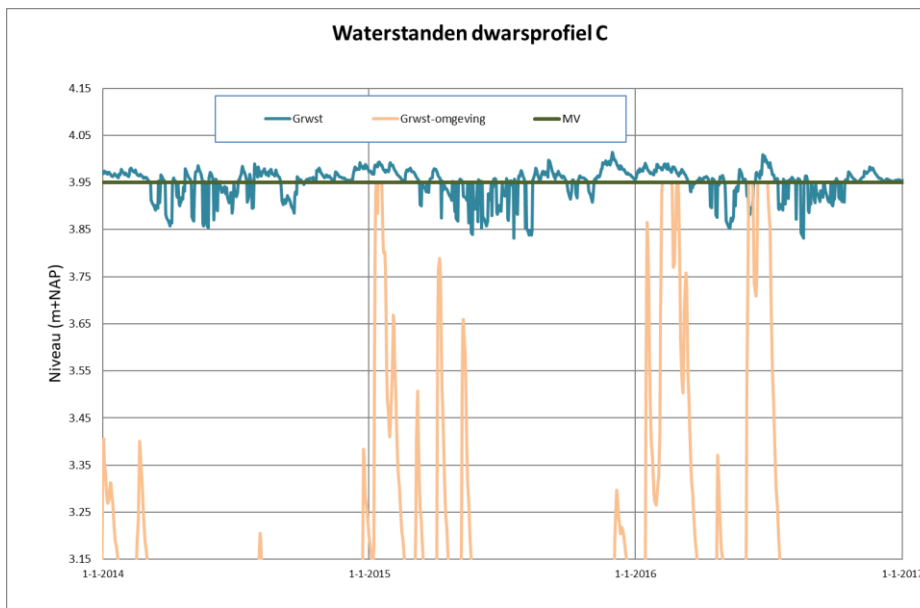
<sup>3</sup> De oranje lijnen tonen de grondwaterstanden in de omgeving van de dwarsprofielen. Deze informatie is gebaseerd op de berekeningsresultaten van een 3D grondwatermodel.



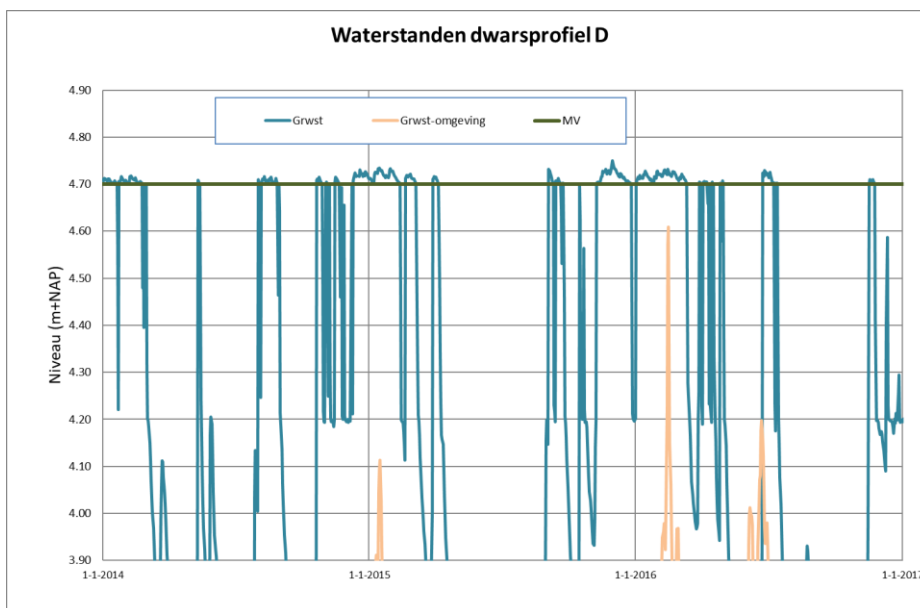
Figuur 7: Berekende grondwaterstanden dwarsprofiel A.



Figuur 8: : Berekende grondwaterstanden dwarsprofiel B.



Figuur 9: : Berekende grondwaterstanden dwarsprofiel C.

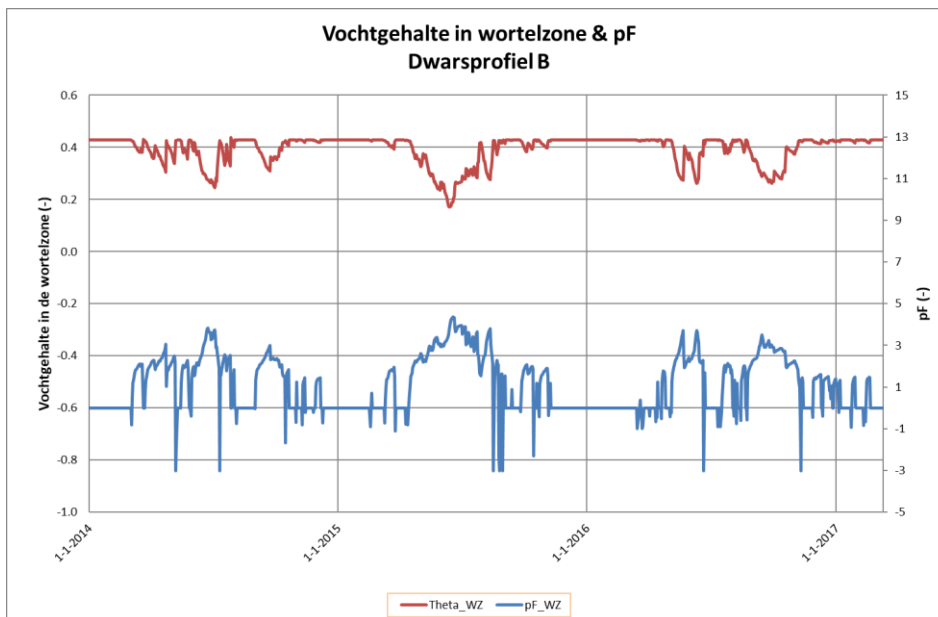


Figuur 10: : Berekende grondwaterstanden dwarsprofiel D.

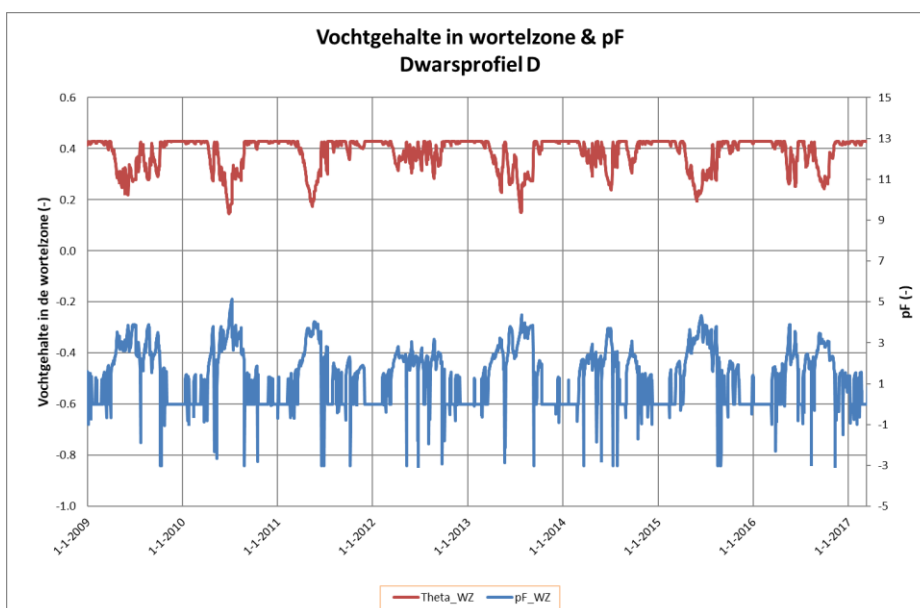
### 3.1.2 Vochttoestand

In de dwarsprofielen A en C is de berekende grondwaterstand steeds op of net onder het maaiveld, waardoor de bodem steeds verzadigd of bijna verzadigd is met vocht.

In de dwarsprofielen B en D kan de grondwaterstand wel uitzakken (figuren 8 en 10). Dat vertaalt zich in tijdelijk lagere vochtgehalten in de bodem (figuren 11 en 12).



Figuur 11: Dwarsprofiel B: berekend vochtgehalte in de wortelzone (Theta\_WZ) en de berekende pF (pF\_WZ).



Figuur 12: Dwarsprofiel D: berekend vochtgehalte in de wortelzone (Theta\_WZ) en de berekende pF (pF\_WZ).

### 3.2 Consequenties voor de te ontwikkelen natuur

Voor de verschillende natuurdoelen voor de natuurontwikkelingslocaties in de Lunenburgerwaard kan uitgegaan worden van de volgende grondwaterstandsranges:

- Glanshaverhooiland (glanshaver) H6510A: vochtig tot matig droog: GVG > 40 cm – maaiveld
- Glanshaverhooiland (grote vossenstaart) H6510B: zeer nat tot vochtig: GVG 0-40 cm – maaiveld. Volgens de index natuur en landschap is dit natuurbeheertype vochtig hooiland.

- Vochtig hooiland: GVG 5-50 cm -maaiveld (uitgaande van klei en zavelgronden).
- Kruiden en faunarijk grasland: GVG veelal > 40 cm – maaiveld
- Dynamisch moeras: GVG +5 tot – 50 cm -mv

Voor het N2000 habitatype glanshaverhooiland H6430 is de grondwaterstandrange overgenomen uit het profielfdocument voor H6430, voor de natuurbeheertypen is de Index Natuur en Landschap geraadpleegd (<https://www.bij12.nl/onderwerpen/natuur-en-landschap/index-natuur-en-landschap/natuurtypen/>).

Uitgaande van het berekende grondwaterstandverloop in paragraaf 3.1 en de bovengenoemde grondwaterstandsranges betekent dit het volgende:

- In de dwarsprofielen A en C is sprake van permanent hoge grondwaterstanden. In de winter staat er water op het maaiveld en in de zomer zakt de grondwaterstand ongeveer 20 centimeter weg. Bij deze permanent hoge grondwaterstanden kan een moerasvegetatie tot ontwikkeling komen. Aandachtspunt bij de moerasontwikkeling is het risico dat de bentonietmat wordt beschadigd door de wortels van een rietvegetatie die zich hier kan vestigen.
- In de dwarsprofielen B en D is sprake van een hoge grondwaterstand in de winter en een wegzakkende grondwaterstand in de zomer. Onder deze omstandigheden kan de vochtige variant van het glanshaverhooiland of (H6510B) of vochtig (glanshaver)hooiland tot ontwikkeling komen.

### 3.3 Vragen en antwoorden

1. *Een alternatief voor bentonietmatten is de traditionele kleiinkassing. (ca 1m dikke kleilaag, ca 1m onder mv). In hoeverre gelden de bevindingen uit deze studie ook voor een kleiinkassing?*

In beide gevallen (bentonietmat of kleiinkassing) kan bij benadering worden gesteld dat de hydraulische weerstand van de laag zodanig hoog is dat de kwel/infiltratieflex heel beperkt is. M.a.w.: op het aspect hydraulische weerstand zijn beide oplossingen vergelijkbaar.

2. *Wat is de impact van de breedte van de bentonietmatten op de bevindingen uit deze studie?*

Het effect ervan is afhankelijk van de hoogteligging van de bentonietmat ten opzichte van de grondwaterstanden in de omgeving. Ligt de mat relatief hoog (t.o.v. de grondwaterstanden in de omgeving) zoals in de Lunenburgerwaard het geval is, dan kan de bodem boven de mat in principe afwateren op de omgeving. In dat geval leidt een bredere mat ertoe dat deze afwatering wordt bemoeilijkt en ontstaan er dus in de bodem boven de mat nattere omstandigheden. Ligt de mat relatief laag (t.o.v. de grondwaterstanden in de omgeving) dan kan de bodem boven de mat in principe NIET afwateren op de omgeving. Een bredere mat verandert daar dan weinig aan de vochttoestand van de bodem boven de mat: die blijft dan overwegend nat.

3. *Is een onderste laag van 30cm schoonzand nodig? Kan eventueel worden volstaan met het volledig terugbrengen van het oorspronkelijk bodemmateriaal?*

Hier geldt in grote lijnen hetzelfde: het effect hangt af van de hoogteligging van de bentonietmat ten opzichte van de grondwaterstanden in de

omgeving. Ligt de mat relatief hoog (t.o.v. de grondwaterstanden in de omgeving) dan leidt het niet aanbrengen van de zandlaag tot nattere omstandigheden in de bodem boven de bentonietmat. Dit leidt tot een ontwikkelingsrichting naar een vochtiger natuurtipe. Een verschuiving van glanshaver hooiland naar moeras is echter niet waarschijnlijk. Ligt de mat relatief laag (t.o.v. de grondwaterstanden in de omgeving) dan maakt het weinig uit voor de vochttoestand van de bodem boven de mat: die blijft dan overwegend nat (moeras).

4. *Om laterale afvoer op locaties zonder deklaag te voorkomen, zou de bentonietmat aan de uiterwaartzijde iets omhoog kunnen lopen, waardoor het water wordt opgesloten. Welk effect zou dit hebben?*

Deze aanlegwijze kan leiden tot nattere omstandigheden in de bodem boven de bentonietmat op de locaties waar deze mat -ten opzichte van de grondwaterstanden in de omgeving- relatief hoog ligt. Dit is het geval in de Lunenburgerwaard. Ligt de mat relatief laag (t.o.v. de grondwaterstanden in de omgeving) dan maakt het weinig uit voor de vochttoestand van de bodem boven de mat: die blijft dan overwegend nat.

5. *In hoeverre is verzuring een probleem omdat er geen uitwisseling plaats kan vinden met het grondwater?*

In de huidige situatie is er al sprake van infiltratie waardoor er ook in de huidige situatie geen invloed van grondwater hoog in het profiel is. Op basis van de bodemeigenschappen in het gebied wordt verwacht dat verzuring geen knelpunt gaat worden (B-Ware, 2021; expert-oordeel B-Ware, 2022). Door verschillende ontwerpmaatregelen wordt er bovendien voor gezorgd dat overtollige neerslag kan worden afgevoerd.

6. *Met 80 cm -maaiveld wordt in het planontwerp bedoeld: 80 cm onder nieuwe maaiveld(hoogte), na afvoer/afplaggen van de voedselrijke toplaag. Als het nieuwe maaiveld lager ligt dan het maaiveld in de huidige situatie, dan geldt dat ook voor 80 cm -maaiveld. Hoe werkt dit door in de modelresultaten?*

Het waterbalansmodel illustreert dat in de Lunenburgerwaard de vochttoestand van de bodem boven de bentonietmat met name wordt bepaald door: de situering van de zandlaag ten opzichte van de deklaag: erin of eronder (en dus in het watervoerend pakket onder de deklaag);

Als het nieuwe maaiveld lager ligt dan het maaiveld in de huidige situatie, dan heeft effect op de afwateringsmogelijkheden van de bodem boven de mat: de (resterende) dikte van de deklaag neemt af (of is zelfs 0 m), waardoor er een beter contact is met het watervoerend pakket → het wordt mogelijk droger boven de matten.

7. *Uitgaande van een constante ligging van de bentonietmat op 80 cm - maaiveld, en gegeven de verschillen in maaiveldhoogte, zou de bentonietmat een golvende ligging krijgen. Daardoor wordt laterale afstroming bepaald door twee assen: loodrecht op de dijk en evenwijdig aan de dijk. In de notitie is alleen de afstroming loodrecht op de dijk beschouwd. Als je de andere as ook in beschouwing neemt, dan vindt op relatief hooggelegen terrein met bentonietmat in de toch laterale afstroming plaats, namelijk via de as evenwijdig aan de dijk naar het laagste punt. Betekent dit dat de hogere locaties altijd uitdrogen in het zomerhalfjaar? En dat lagere locaties natter kunnen zijn dan berekend?*

Inderdaad. Per locatie is te bekijken wat het meest relevante afwateringsniveau is en welke hydraulische weerstand gekoppeld kan worden aan dat afwateringsniveau. In de notitie is uitgegaan van een langgerekte vorm van de matten parallel aan de dijk. Voor de afwatering is in die situatie de kortste zijde het meest relevant: de weerstand voor afstroming is in die richting kleiner dan in de lengterichting. Vandaar dat ervoor is gekozen alleen de stroming loodrecht op de dijk te beschouwen.

8. Betekent een toename van moerassige milieus die periodiek door rivierwater worden overstroomd ook een toename van het oppervlak KRW-relevant areaal in de uiterwaarden?

Een toename van moerassig milieu dat periodiek inundeert draagt niet altijd bij aan het oppervlak KRW-relevant areaal. Dat is alleen het geval wanneer het om structuren rondom kolken, geïsoleerde strangen, meestromende nevengeulen en dergelijke gaat. Die structuren zijn sowieso al KRW-relevant.

## 4 Conclusies

### Modelresultaten

Het grondwaterregime (of meer algemeen: de vochttoestand van de bodem) boven de bentonietmat wordt met name bepaald door:

- Het verloop van de neerslag en verdamping;
- De mate waarin de 30 cm dikke zandlaag op de bentonietmat drainerend kan werken. Dit hangt af van:
  - De hoogteligging van de bentonietmat ten opzichte van de grondwaterstanden in de omgeving;
  - De situering van de zandlaag ten opzichte van de deklaag: erin of eronder (en dus in het watervoerend pakket onder de deklaag);
  - De breedte van de strook waar de bentonietmat wordt aangebracht.

Op de relatief laag gelegen locaties, met name waar nog een deklaagdikte resteert onder het bentonietmat niveau:

- blijven ook in de zomerperioden de grondwaterstanden ondiep (doorgaans < 20 cm-mv); in de winter is de grondwaterstand overwegend aan- of op het maaiveld
- vindt ontwatering vrijwel uitsluitend plaats via stroming over maaiveld.
- blijft de wortelzone ook in de zomer bijna geheel verzadigd met water.

Op de relatief hoog gelegen locatie, met name waar geen deklaag aanwezig is onder het bentonietmat niveau:

- zakt de grondwaterstand diep uit (> 80 cm-mv)
- vindt de ontwatering voor een belangrijk deel plaats via de zandlaag op de bentonietmat (=laterale drainage)
- droogt de bodem in de zomerperiode uit tot pF = 4; in de winter is de grondwaterstand overwegend aan het maaiveld.

### Wat betekent dit voor de te ontwikkelen natuur?

De modelresultaten geven aan dat in de Lunenburgerwaard mogelijkheden ontstaan voor de ontwikkeling van zowel glanshaverhooiland (met name vochtig glanshaverhooiland) als moeras.

#### *Glanshaverhooiland*

In de drogere delen van het gebied waar de voorjaarsgrondwaterstand hoog is maar in de zomer wegzakt, kan een ontwikkeling plaatsvinden richting glanshaverhooiland. Gezien de hoge voorjaarsgrondwaterstand gaat het hier om de vochtige variant van het glanshaverhooiland. Deze situatie treedt op doordat de deklaag de afvoer via de zandlaag op de bentonietmat niet beperkt. Op de hogere terreindelen waar de voorjaarsgrondwaterstand lager is, kan de niet-vochtige variant van het glanshaverhooiland tot ontwikkeling komen. Om de ontwikkeling richting (vochtig) glanshaverhooiland mogelijk te maken moet de voedselrijke toplaag worden afgevoerd.

#### *Moeras*

In de nattere delen van het gebied is de grondwaterstand zowel in de winter als in de zomer hoog. In de zomer zakt de grondwaterstand maximaal ca. 20 cm uit. Deze natte situatie in delen van de Lunenburgerwaard ontstaan doordat de ontwatering van de bodem boven de bentoniet mat wordt belemmerd door de



deklaag. Ook voor de ontwikkeling richting moeras is het noodzakelijk dat de voedselrijke toplaag wordt afgevoerd.

Aandachtspunt bij de moerasontwikkeling is het risico dat de bentonietmat wordt beschadigd door de wortels van een rietvegetatie die zich hier kan vestigen

## 5 Verwijzingen

B-Ware. (2021). *Onderzoek bodemopbouw, bodem- en hydrochemie Amerongse Bovenpolder.*

## Bijlage 1: Beschrijving waterbalans model

Ten behoeve van de modelberekeningen die in deze memo gepresenteerd zijn, is een bestaand model voor de modellering van de onverzadigde zone gebruikt. Een complete beschrijving van het model vindt u in het document Waterbalans 2016 (Sweco, 2016).

Het model in het kort:

- modellering van het oppervlaktewater, de onverzadigde- en de verzadigde zone
- 21 voorgedefinieerde bodemtypen
- berekening van de verdampingsreductie op basis van de potentiaal in de wortelzone
- berekening van de potentialen, grondwaterstand en oppervlaktewaterstand
- één bakje grondwater, één voor oppervlaktewater en twee bakjes voor de onverzadigde zone (wortelzone en ondergrond).

De bestaande modelcode is op twee punten specifiek gemaakt voor de modellering van de grondwaterstanden en de vochttoestand van de bodem boven de bentonietmat:

- Het niveau van het oppervlaktewater wordt als externe parameter ingebracht in plaats van gemodelleerd. In de modellering wordt dit niveau gebruikt als afwateringsniveau (grondwaterstand in de omgeving van de bentonietmat)
- Als in de berekening de grondwaterstand zakt tot in de zandlaag boven de bentonietmat, vindt er geen nalevering meer plaats van water uit de verzadigde zone. De bentonietmat wordt namelijk als ondoorlatend beschouwd.

De drainageweerstand voor laterale stroming is berekend op basis van:

- De dikte van de zandlaag op de bentonietmat (30 cm)
- De doorlatendheid van de zandlaag (30 m/d)
- De breedte van de bentonietmat (m)
- De resterende dikte van de deklaag onder de bentonietmat, waarbij is uitgegaan van een hydraulische weerstand van 200 (d/m).

De berekeningsmethode van deze weerstand is gebaseerd op de publicatie *Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel* (Figuur 13). Als slootafstand  $L$  is twee maal breedte van de bentonietmat gebruikt; de weerstand van de bodem van het oppervlaktewater is gelijk gesteld aan de hydraulische weerstand van de resterende dikte van de deklaag onder de bentonietmat.

$$W_{dr} = c^* - c_1$$

$$c^* = (c_b + c_1) \cdot F_L + (c_b \cdot L / u) \cdot F_B$$

De termen  $F_B$  en  $F_L$  staan voor de volgende hyperbolische functies:

$$F_B = X_B \cdot \operatorname{ctnh}(X_B)$$

$$F_L = X_L \cdot \operatorname{ctnh}(X_L)$$

De termen  $X_B$  en  $X_L$  kunnen worden gezien als respectievelijk de 'slootbreedte-invloed' en de 'slootafstand-invloed' in de voedingsweerstand ( $c^*$ ):

$$X_B = u / 2 \cdot \lambda_B$$

$$X_L = L / 2 \cdot \lambda_L$$

$$\lambda_B = (K \cdot H \cdot c_1 \cdot c_b / c_1 + c_b)^{1/2}$$

$$\lambda_L = (K \cdot H \cdot c_1)^{1/2}$$

$W_{dr}$  = drainageweerstand [T]  
 $c^*$  = voedingsweerstand [T]  
 $c_1$  = weerstand van de slechtdoorlatende laag [T]  
 $c_b$  = weerstand van de bodem van het oppervlaktewater [T]  
 $L$  = slootafstand [L]  
 $u$  = natte omtrek van de sloot [L]  
 $\lambda_L$  = spreidingslengte van het perceel [L]  
 $\lambda_B$  = spreidingslengte van de sloot [L]  
 $K$  = doorlatendheid van de toplaag [ $L \cdot T^{-1}$ ]  
 $H$  = verzadigde dikte van de toplaag [L] (i.e. grondwaterstand van de toplaag)

$$\lambda_B = l_B = \sqrt{\frac{k_{0,x} H_0 c_1 c_0}{c_1 + c_0}} =$$

$$\lambda_L = l_L = \sqrt{c_1 k_{0,x} H_0} = c$$

Figuur 13: Berekening van de drainageweerstand voor drainage via de zandlaag op de bentonietmat volgens W. de Lange (1997).