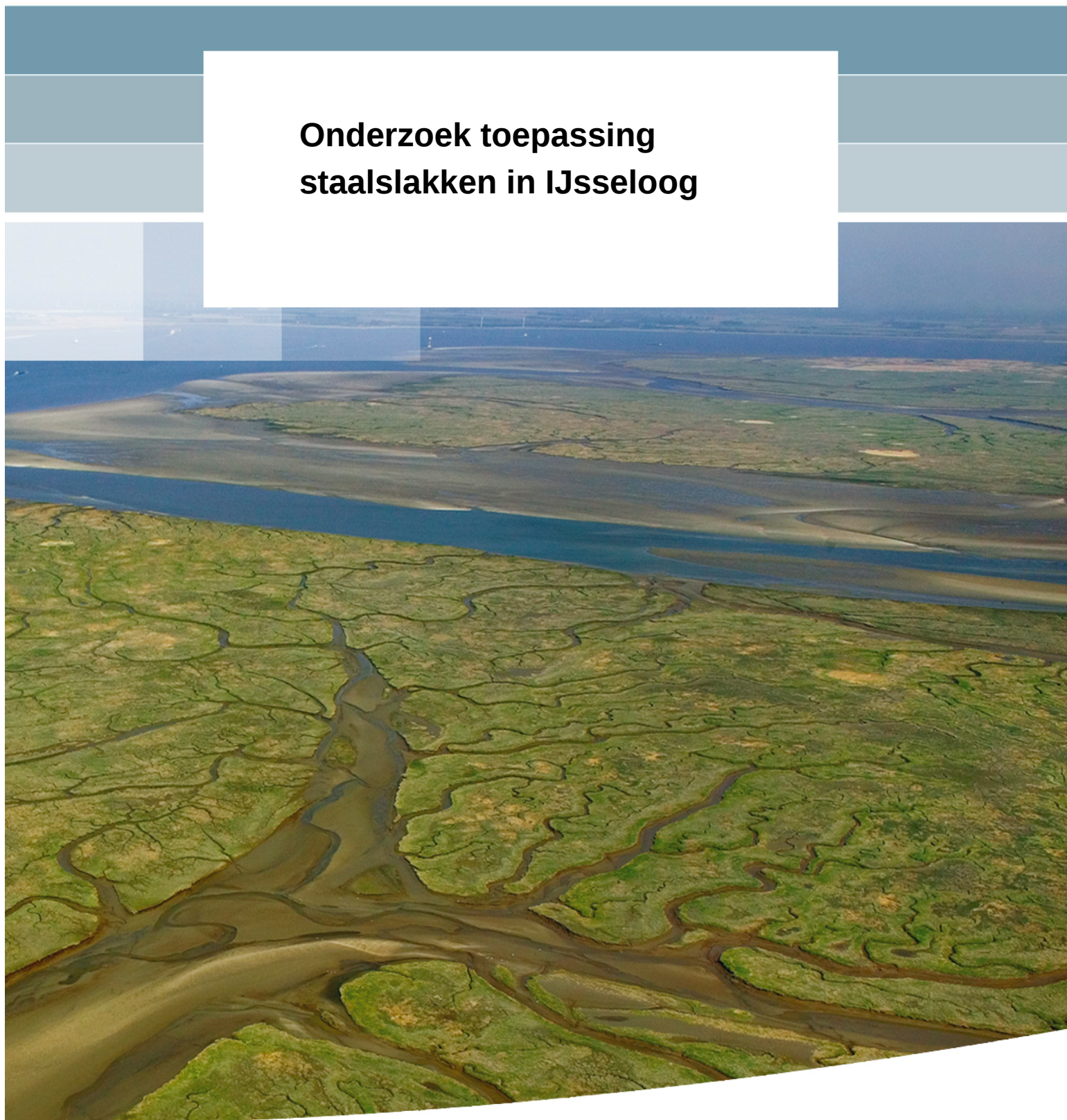


**Onderzoek toepassing
staalslakken in IJsseloog**



Onderzoek toepassing staalslakken in IJsseloog

Persoonsgegevens

1220509-000

Titel

Onderzoek toepassing staalslakken in IJsseloog

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Project

1220509-000

Kenmerk

1220509-000-ZWS-0011

Pagina's

40

Trefwoorden

Steunberm, stabiliteit, consolidatie, depot isolatie, emissie

Samenvatting

De ontmanteling van de Averijhaven vraagt om een herallocatie van het in het depot geborgen slib en het materiaal van de dijk, staalslakken. Voor IJsseloog is het met het oog op het toekomstig herbestemmen van het eiland gunstig het landareaal uit te breiden. Ook voor het tijdelijk kunnen bergen van grond ter afwerking van het depot (de leeflaag) is het noodzakelijk opslagcapaciteit in de vorm van een groter landareaal te creëren. Omdat het depot niet vol zal komen is aan de binnenkant van het depot een steunberm nodig om deze landuitbreiding mogelijk te maken.

In dit rapport wordt nagegaan of het mogelijk is om met het materiaal uit de Averijhaven een steunberm aan te leggen. Het gaat hierbij om het hergebruik van de staalslakdijk als steunberm, waarbij het aanbrengen van Averijhaven slib een stabiliserende functie heeft. Een extra uitdaging is dat deze steunberm bij voorkeur (deels) op een al met slib bedekt talud wordt aangelegd, waarbij de steunberm niet teveel mag afschuiven om zijn functie te behouden. Deltares heeft door middel van veldwerk (check taludhelling en dikte sliblaag), laboratoriumproeven (zowel naar de chemische als naar de fysische eigenschappen van het materiaal) en modelberekeningen (emissie uit de staalslaksteunberm, stabiliteit van de steunberm) de vraag of en hoe een steunberm aangelegd kan worden zo nauwkeurig mogelijk beantwoord. De conclusie is dat het technisch mogelijk is, al zal er met enige afschuiving (maximaal 12 meter bij slim aanbrengen) rekening gehouden moeten worden. Daarnaast kan de aanleg van de staalslaksteunberm zonder overschrijding van de in de huidige vergunning toegestane emissie naar grond- en oppervlaktewater.

Door de vaak oorzakelijke relatie tussen aanlegkeuzes en verwachte effecten wordt in dit rapport uitgegaan van een aantal specifieke scenario's om te verkennen wat de (on-) mogelijkheden zijn bij het ontwerpen en aanleggen van een staalslakken-steunberm op het binnentalud van depot IJsseloog. Dit rapport schrijft geen aanlegkeuzes voor. Het rapport biedt daarnaast informatie over de context van het project, het beschrijft de materiaaleigenschappen nu en na aanleg, en schetst de technische en milieu hygiënische randvoorwaarden (vergunningseisen). Hieruit volgen aandachtspunten en randvoorwaarden. Gegadigde kunnen van deze informatie gebruik maken bij inschrijving.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	mrt. 2016		Persoonsgegevens		Persoonsgegevens		Persoonsgegevens

Status

definitief

Inhoud

1 Samenvatting	1
1.1 Aanleiding en doelstelling	1
1.2 Randvoorwaarden voor de verkenning aanleg staalslaksteunberm	1
1.2.1 Randvoorwaarden aan de functionaliteit van de steunberm:	2
1.2.2 Randvoorwaarden vanuit de vigerende Wm en Wvo vergunning:	2
1.3 Het aanbrengen van een staalslaksteunberm op het talud	3
1.3.1 Een steunberm op slib.	4
1.3.2 Een alternatief, een steunberm deels op het -6 m plateau.	5
1.3.3 Overzicht, de belangrijkste verschillen tussen de scenario's en een impressie van het eindbeeld in het voorkeursscenario	5
1.4 De geohydrologische isolatie op het talud	7
1.5 De chemie: de pH en mogelijke colloïdale deeltjes in het retourwater	9
1.5.1 pH	9
1.5.2 De vorming van colloïdale deeltjes	9
1.5.3 De emissie van zware metalen	9
1.5.4 De emissie van zouten, waaronder bariumsulfaat	9
1.5.5 Overall conclusie chemie, aanbevelingen voor Programma van Eisen	10
2 Het aanbrengen van een staalslaksteunberm op het talud	11
2.1 Samenvattend, de berekende horizontale afschuiving in het basisscenario	11
2.2 Frictie op het grensvlak staalslak/slib & effectieve stress in het slib	12
2.3 Aanbrengen deklaaggrond	14
2.4 Maatregelen om afschuiving te voorkomen	14
2.4.1 Aanbrengen onder een minder stijl talud (1:2 i.p.v. 1:1.5).	15
2.4.2 Aanbrengen van extra slib	15
2.4.3 Gefaseerd aanbrengen van de steunberm (meerdere rondgangen).	15
2.4.4 Technische maatregelen om de steunberm of het slib te stabiliseren	16
2.5 De vorm van de steunberm en de wijze van aanbrengen	16
2.6 Alternatieve materialen voor de steunberm	17
3 De geohydrologische isolatie op het talud	19
3.1 SIC resultaten	20
3.2 Belastingsproeven met staalslak	21
4 De chemie: de pH en mogelijke colloïdale deeltjes in het retourwater	23
4.1 pH	25
4.2 Colloïdale deeltjes	26
4.2.1 Aluminiumhydroxide	27
4.2.2 Bariumsulfaat	29

Bijlage(n)

A Bijlagen

A.1	Modellering van de pH en colloïdale deeltjes, vorming van colloïdale deeltjes	A-1
A.2	Modellering van de pH en colloïdale deeltjes, laagverfijning	A-1
A.3	Samenstelling staalslak, sediment en water in het geochemisch model	A-5
A.4	Gemeten samenstelling	A-9

1 Samenvatting

1.1 Aanleiding en doelstelling

Het aanbrengen van een steunberm aan de binnenzijde van depot IJsseloog is wenselijk voor de uitbreiding van het landareaal van het eiland. De landuitbreiding is mogelijk door de overhoogte van de dijk te benutten en dekgrond aan te brengen. De landuitbreiding creëert meer mogelijkheden voor de herbestemming van IJsseloog. Voor de steunberm dient materiaal met een hoge dichtheid en een hoge haakweerstand gebruikt te worden, om zo extra stevigheid aan de grond te bieden en een steil talud mogelijk te maken. Staalslakken zijn hier geschikt voor. Het hergebruiken van de staalslakedijk van de Averijhaven als staalslakberm in IJsseloog is daarmee een gelijkwaardige nuttige toepassing. Dit onderzoek is een verkenning naar deze nuttige toepassing.

Het onderzoek "Stabiliteit staalslakbinnenring (of steunberm) IJsseloog" moet antwoord geven op de vragen:

- Of (en hoe) het aanbrengen van een staalslaksteunberm op het talud mogelijk is.
- Of het aanbrengen van een staalslaksteunberm de geohydrologische isolatie van het depot richting het grondwater aantast, of juist verbeterd.
- Of het aanbrengen van een staalslaksteunberm gevolgen heeft voor de waterkwaliteit van het retourwater, inclusief het al dan niet voorkomen van colloïdale deeltjes

Omdat het bouwen van een steunberm op een talud dat bedekt is met slib niet eerder is uitgevoerd heeft Rijkswaterstaat Deltares gevraagd onderzoek te doen naar de condities waaronder dit in het depot mogelijk is. De meetresultaten staan in een apart rapport "Steal Slag Stability - Laboratory and Geotechnical Technical Report, Deltares project 1220509, 2016". In dit rapport wordt op basis van deze meetresultaten en het consolidatiemodel FSconbag een aantal scenario's geschetst voor het aanbrengen van de steunberm op het talud.

Naast de technische realisatie van de steunberm spelen er in het depot veel milieu-hygiënische randvoorwaarden, zoals de emissie vanuit het depot naar het grond en oppervlaktewater. Ook op deze aspecten wordt in dit rapport ingegaan.

1.2 Randvoorwaarden voor de verkenning aanleg staalslaksteunberm

De primaire functie van de staalslaksteunberm is het mogelijk maken van uitbreiding van het landareaal. Veel van de randvoorwaarden die in deze verkenning zijn meegenomen worden mede gedictieerd door de vigerende vergunningen. Omdat in het depot zoveel mogelijk gewerkt wordt met de natuurlijke buffer capaciteit van het slib om verontreinigingen te binden (en niet zoals in een landdepot met folies of andere vormen van kunstmatige afdichting) heeft er onder regie van Rijkswaterstaat in de afgelopen 25 jaar veel onderzoek plaatsgevonden naar de wijze waarop door slim depotbeheer de depotisolatie kan worden geoptimaliseerd. Daar waar relevant voor de randvoorwaarden worden de onderzoeksrapporten genoemd.

1.2.1 Randvoorwaarden aan de functionaliteit van de steunberm:

- De steunberm dient een nuttige toepassing te zijn binnen het Bbk, met als doel op het depot talud steun te bieden tegen het afschuiven van de nog te bergen dekgrond en zand uit de ringdijk, om zo het landareaal van IJsseloog te kunnen vergroten.
 - o De steunberm dient steun te bieden aan het bergen van dekgrond plus de reallocatie van zand uit de ringdijk.
 - o De belasting op het talud bij aanleg dient door een gelijkmatige aanleg van de steunberm geminimaliseerd te worden
 - o Het extra landareaal dat ondersteund door de steunberm gemaakt kan worden dient zo groot mogelijk te zijn.
 - o De vorm van de steunberm is rond tot ovaal, oftewel de steunberm maakt gebruik van de gehele rondgang.
 - o De steunberm mag met de top niet boven het niveau -3,0 m N.A.P. uitkomen.
 - o De steunberm dient steun te bieden aan zowel het zand uit de ringdijk (de aanvulling) als ook aan dekgronden (herkomst nog onbekend) tot een maximale hoogte van een belasting met dekgrond tot +10,0 m N.A.P.
 - o De steundijk dient bij voorkeur stabiel op het talud aangebracht te worden. Indien stabiel aanbrengen niet mogelijk is, moeten optredende afschuivingen voorspelbaar en gecontroleerd plaatsvinden (zowel bij aanbrengen als in toekomstige belastingssituaties).

1.2.2 Randvoorwaarden vanuit de vigerende Wm en Wvo vergunning:

- Voor de Wm vergunning houdt dit in dat de afdichting richting het grondwater te allen tijde gegarandeerd dient te zijn.
 - Er mag geen direct contact zijn tussen de staalslakken en het grondwater. De scheidende laag ligt op een diepte van -9,0 m tot -8,0 m NAP, maar deze is plaatselijk doorbroken. Om voldoende isolatie richting het grondwater te garanderen dient minimaal een 5 meter dikke bodem aanwezig te zijn op de delen waar geen slib (op het talud) aanwezig is.
 - Er dient rekening gehouden te worden met het eindpeil van circa 0,0 m NAP, ook dan dient er geen (*) inzijging richting het grondwater plaats te vinden.
 - Door variatie in verdamping, neerslag en het peil in het Ketelmeer wordt met circa 0,0 m NAP een peilvariatie van +/- 0,50 m t.o.v. het in het IJsselmeer/Ketelmeer ingestelde zomer/winterpeil bedoeld.
 - Het 1^e aquifer begint op -9,0 m NAP, met een scheidende laag tussen -8,0 m en -9,0 m NAP. De scheidende laag is niet 100% afdichtend richting grondwater.
 - Voor het afdichten naar het grondwater kan gebruik gemaakt worden van al aangebrachte slib op het talud, aangevuld met het slib uit de Averijhaven (**).

(*) Wat er onder 'geen inzijging' verstaan wordt is uitgewerkt in het Deltares rapport "Monitoring inslibproef IJsseloog" (project 1208489, 2015)

(**) De benodigde sliblaagdikte als isolatievoorziening onder de staalslakberm is uitgewerkt in de Deltares memo "Waterstanden versus benodigde sliblaagdikte talud" (project 1220509, 2016)

- Voor de Wvo vergunning dient de emissie bij aanleg en na oplevering te voldoen aan de in de vergunning gestelde eisen (***)
 - o De Wvo vergunning is erop gericht dat de emissie naar oppervlaktewater plaatsvindt via het retourwater van het depot. Er dient geen contact met staalslakken plaats te vinden in de stroombanen in het freatisch pakket die direct afwateren op het Ketelmeer. Afhankelijk van de exacte eindinrichting is de waterscheiding circa halverwege het land areaal. Op het smalste punt van het eiland (West) is de doorsnede 110 meter. De staalslaksteunberm moet dan hier minimaal 55 meter van de oever vandaag blijven. Aan de Oost zijde is de doorsnede 130 meter, de minimale oever afstand bedraagt 65 meter.
 - o De zwevend stof concentratie in het retourwater dient beneden de 30 mg/l te blijven.

(***) De effecten op de emissie naar oppervlaktewater van een aantal aanlegvarianten is beschreven in het Deltares rapport “Onderzoek toepassing staalslakken in IJsseloog” (project 1220509, 2016)

1.3 Het aanbrengen van een staalslaksteunberm op het talud

Met de koppeling tussen het ontmantelen van de Averijhaven en het bergen van de hierbij vrijkomende staalslakken in IJsseloog is een gelijkwaardige toepassing voor de staalslakken gecreëerd. Het aanbrengen van een staalslaksteunberm is wenselijk voor de uitbreiding van het landareaal IJsseloog. Indien er geen steunberm gemaakt wordt, maar er alleen grond gebruikt wordt op het depot talud is aanzienlijk meer grond nodig. Niet alleen om het volumeverlies van de staalslakken te compenseren, maar met name omdat met de staalslakken een scherp talud (1:1½) gemaakt kan worden, waardoor de grond niet het depot in schuift. Zonder steunberm risico bestaat het risico dat de grond gaat bressen.

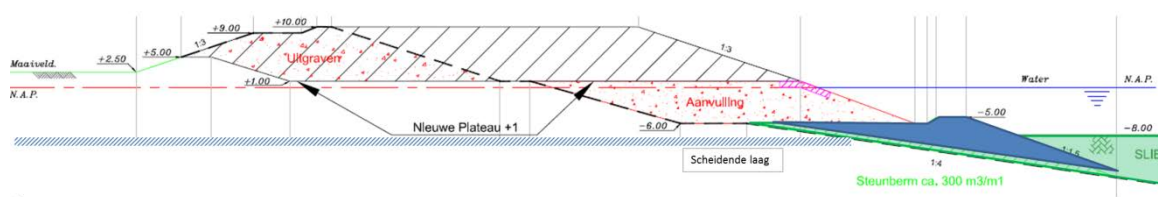


Figuur 1.1 Voorbeeld oeverval (bresvorming) bij een te stijl zand/grond talud, (Optimum, Informatiemagazine voor de GWW sector, Nr. 9, september 2002, blz. 6-9, onderzoek uitgevoerd door Deltares).

Voor het aanleggen van de staalslaksteunberm zijn in deze studie twee opties beschouwd:

- Een steunberm met een top op -5,0 m NAP, een vlak plateau op -6,0 NAP en een teendiepte op -20,0 NAP. *Onder de steunberm ligt slib.*
- Een alternatieve locatie, waarbij de steunberm deels rust op de omloop op -6,0 m NAP. *De steunberm steunt deels zand.*

1.3.1 Een steunberm op slib.



Figuur 1.2 Een schets van de steunberm op het slib talud

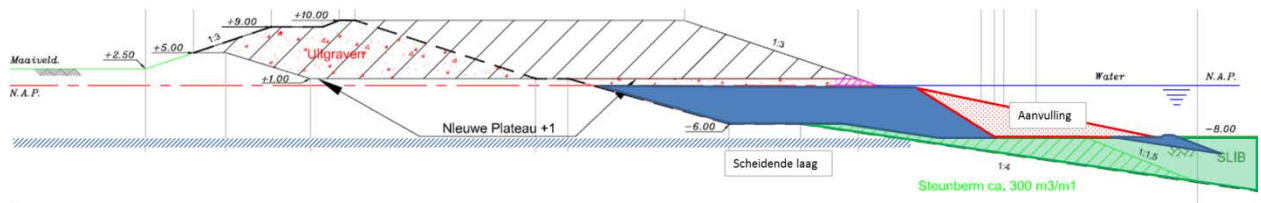
Bij de aanleg van de staalslaksteunberm op het onderwatertalud (zie Figuur 1.2.) gaat de steunberm afschuiven. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van slib onder de steunberm. Aangezien het niet wenselijk is dit slib te verwijderen (het slib isoleert het depot richting het grondwater) zal rekening gehouden moeten worden met het afschuiven van de steunberm totdat het in het depot aanwezige slib voor een stabiele tegendruk zorgt. Bij het in één rondgang aanbrengen van de staalslakken bedraagt de afschuiving circa 30 meter.

Door vooruitlopend op de aanleg van de steunberm het slib uit de Averijhaven te bergen kan op de locaties van de steunberm een extra slibpakket van +4.6 meter gecreëerd worden (door het preferent aanbrengen van slib op het talud). De afschuiving bedraagt dan nog circa 20 meter, mits de staalslakken voldoende diep wegzakken in het slib.

Door de steunberm in meerdere rondgangen aan te brengen wordt de afschuiving verminderd tot circa 10 meter per rondgang, en wordt de sliblaag onder de steunberm stabiel (door verlaging van de waterspanning). Aanbevolen wordt om voor de staalslaksteunberm drie rondgangen met elk een tijdsverloop van minimaal 100 dagen aan te houden. Hierdoor krijgt het slib onder de steunberm meer tijd om de wateroverspanning af te voeren en kan het slib door de staalslak belasting consolideren. Volledige consolidatie van een 4 meter dikke sliblaag (de geschatte slibdikte onder de steunberm na verdringing) duurt 5 jaar, dan pas is de maximale schuifsterkte bereikt. De steunberm zelf wordt gedurende de aanleg gestabiliseerd door het afschuiven in het al aanwezige slib. Nadat de steunberm is aangebracht en niet meer afschuift is voor het aanbrengen van de grond een stabilisatie periode van vijf jaar gewenst. Deze periode van stabilisatie geldt alleen voor de grond die direct steunt op de steunberm, en kan verkort worden indien blijkt dat het slib eerder voldoende sterkte heeft (toename schuifsterkte met 10 tot 15 kPa ten gevolge van consolidatie onder het gewicht van de staalslakken) en dan geen poriewateroverspanning meer heeft.

Aangezien afschuiving vrijwel zeker plaats zal vinden is het af te raden om de steunberm met kiepauto's vanaf de kant aan te leggen. Andere aanbrengvormen zoals een drijvend ponton, een conveyor belt, hydraulisch verpompen of een grijper met lange arm vanaf de kade zijn wel mogelijk.

1.3.2 Een alternatief, een steunberm deels op het -6 m plateau.



Figuur 1.3 Een schets van de steunberm op het -6m plateau

Dit alternatief wordt als voorbeeld uitgewerkt. Het voldoet, zoals geschetst in Figuur 1.3, niet aan alle randvoorwaarden vanuit de vergunning. Zo is de afstand tot de scheidende laag op het -6,0 m NAP plateau te gering.

Een mogelijk alternatief is het benutten van het plateau dat op -6,0 m NAP aanwezig is. Voordeel is dat het deel van de staalslaksteunberm dat boven de -6,0 m NAP aangelegd kan worden deels vlak loopt (het plateau), of direct op zand aangebracht kan worden. De afschuivende kracht bedraagt nog slechts circa 60% van de afschuivende kracht ten opzichte van de variant waarin de steunberm volledig op het talud rust. Dit omdat 40% van het volume aan staalslakken zich op de berm bevindt (zie figuur 1.3).

Deze variant kent ook een aantal aandachtspunten. De afstand tussen het plateau en het 1^e WVP (begrenst door de scheidende laag op -8,0 NAP) is te gering om de berm zonder afdichtende voorzieningen aan te leggen (emissie eis naar het grondwater vanuit de Wm vergunning). Ook dient een bestemming gevonden te worden voor het zand dat vrijkomt bij het verlagen van de dijk (in Figuur 1.3 is dit zand binnen het depot als afdekmateriaal van de staalslakken toegepast, in de Figuur is dit aangegeven met de driehoek 'aanvulling', die deels in het slib gaat wegzakken). Een deel van de staalslakberm (en eventueel de zand aanvulling) zal alsnog op het talud geborgen moeten worden. Dit vereist een 2^e, kleinere, steunberm aan de teen van de aanvulling, die ook in het slib gaat wegzakken. Deze 2^e steunberm zal ook met afschuiving te maken krijgen, en dient daarmee aantoonbaar gestabiliseerd te worden.

1.3.3 Overzicht, de belangrijkste verschillen tussen de scenario's en een impressie van het eindbeeld in het voorkeursscenario

De belangrijkste verschillen en voor- en nadelen van de twee voorbeeldscenario's staan weergegeven in Tabel 1.1.

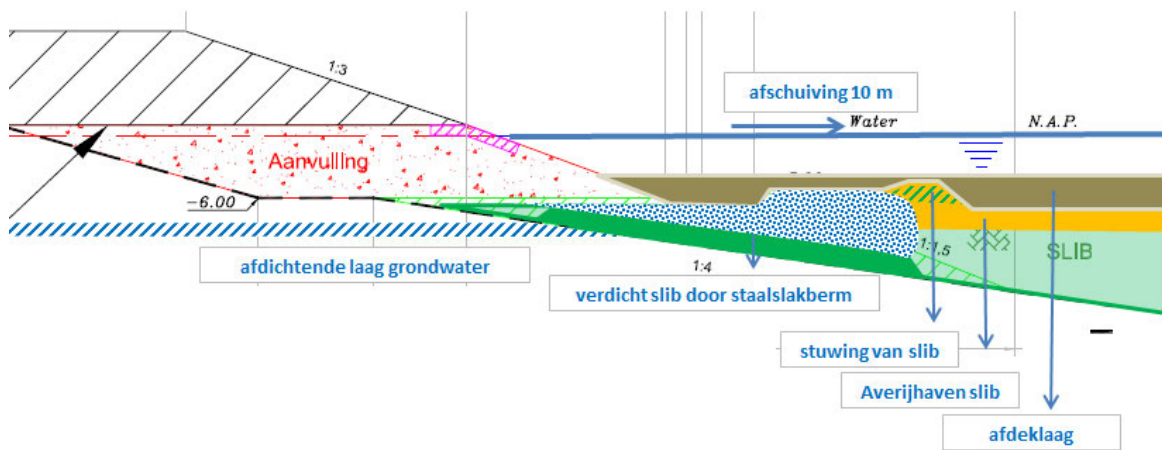
Tabel 1.1 Overzicht belangrijkste kenmerken verschillende steunberm scenario's

Scenario	Top berm (m NAP)	onderkant (m NAP)	Samenvattend: De steunberm voldoet in beide scenario's aan zijn primaire functie, steun bieden voor deklaaggrond.
1 Berm op slib	-5.0	-20.0	PLUS: Aanvulzand als buffer (6 m) tussen staalslakken en dekgrond. MIN: Potentieel meer afschuiving.
2 Berm deels op -6 m NAP plateau	0.0	-8.0	PLUS: Aanbrengen deel op plateau (circa 40%) kan zonder risico op afschuiven. MIN: Isolatie richting grondwater verdient aandacht. 2e steunberm nodig indien zand uit de dijk als aanvulling wordt ingezet.

Voor het scenario “berm op slib” kan een impressie geschetst worden waarbij voldaan wordt aan alle in de Wvo en Wm vergunning gestelde eisen met betrekking tot de emissie, en rekening gehouden wordt met:

- de te verwachte afschuiving,
- de compactie van het slib (door de belasting met staalslak),
- het stuwven van slib door de afschuiving (nog niet gekwantificeerd),
- het aanbrengen van Averijhavenslib, en
- de afdeklaag van schoon slib of grond die op het Averijhavenslib slib wordt aangebracht (nog niet in berekeningen opgenomen).

In Figuur 1.4 wordt een impressie gegeven van deze eindsituatie.



Figuur 1.4 Indruk eindbeeld IJsseloog, scenario steunberm op slib

1.4 De geohydrologische isolatie op het talud

In 2014 is door RWS op aanraden en onder begeleiding van Deltares het nog naar het grondwater openstaande deel van het talud IJsseloog dichtgesproeit met slib ("Monitoring inslibproef IJsseloog, A.J. Wijdeveld, project 1208489, 2015"). Hoewel het voor het aanbrengen van de steunberm de voorkeur zou verdienen om de sliblaag weg te halen om de steunberm zo direct op het zand te kunnen plaatsen is dit vanuit milieuhygenisch punt niet aan te raden.

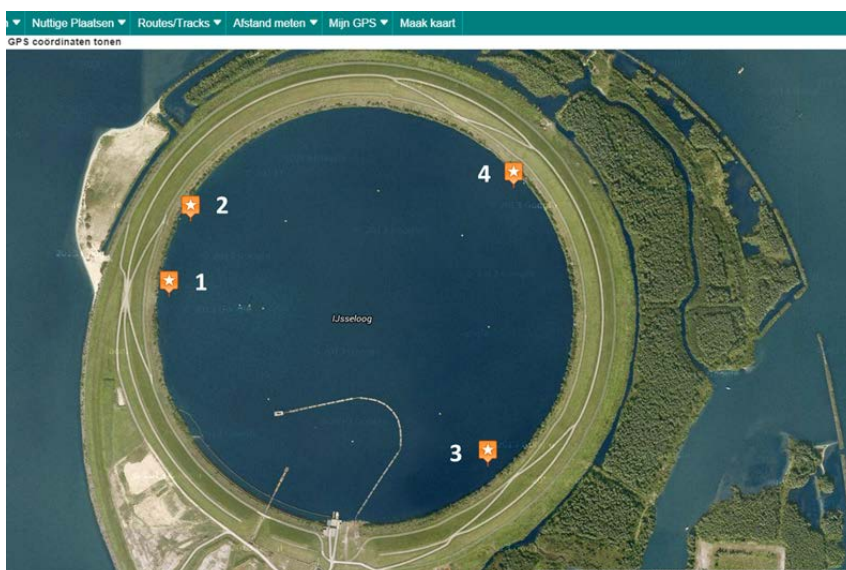
Randvoorwaarde is dan ook dat:

- De sliblaag aantoonbaar aanwezig is op het talud
- De sliblaag een dermate lage permeabiliteit heeft dat de afdichting richting grondwater gegarandeerd is

Een belangrijke keuze is het zoveel mogelijk op het talud aanbrengen van Averijhaven slib (zie de opmerking in paragraaf 1.1), vooruitlopend op de aanleg van de staalslaksteunberm. Dit levert een sliblaagdikte van +4,6 meter op (+3,2 meter bij homogeen aanbrengen). Indien het Averijhavenslib als eerste geborgen wordt is het bewijzen van de exacte mate van afdichting van het talud niet nodig. Het slibniveau (minimaal -5,8 m NAP) ligt dan ruimschoots boven het niveau van de laag die het watervoerend pakket afdicht (-8,0 m NAP).

In de in deze studie uitgevoerde beschouwing is gekeken naar de huidige sliblaagdikte. Deze bedroeg in de echo sounding gemiddeld 20 cm. In de gestoken kolommen varieerde de sliblaagdikte tussen de 10 en 30 cm, met een gemiddelde van 20 cm.

In "Monitoring inslibproef IJsseloog, 2015" is de doorlatendheid berekend bij een waterpeil van -3,6 NAP (stijghoogteverschil 1,2 m). De benodigde K waarde bedroeg $4,2E-4$ m/dag bij een sliblaagdikte van 50 cm. Tabel 1.2 geeft de gemeten doorlatendheid op basis van de in IJsseloog gestoken kolommen.



Figuur 1.5 Monsterlocaties IJsseloog

Tabel 1.2 K waarde (m/dag) IJsseloog slib op het talud, vier locaties gemeten in duplo

Column #	Location	k-value [m/day]	k-value [m/s]
1	3B	1.51E-03	1.75E-08
2	4A	1.35E-03	1.57E-08
4	1C	2.89E-03	3.34E-08
5	4C	1.13E-02	1.31E-07
7	1A	1.34E-04	1.55E-09
8	2C	1.40E-03	1.62E-08

Op locatie 4 is op enkele plekken grover materiaal (brokken > 2 mm, steenachtig (breukstructuur)) aangetroffen.



Figuur 1.6 Steenachtig materiaal op locatie 4.

Dit verklaart waarom de k waarde voor kolom 5 afwijkt (permeabel). Alleen locatie 1A voldoet aan de gestelde voorwaarde van < 4,2E-4 m/dag. Kanttekening is dat de berekening is uitgevoerd voor een slibniveau van -9,0 m NAP (op basis van de IJsseloog jaarrapportage 2014). Momenteel is het slib niveau -8,0 m NAP. In de memo "Waterstanden versus benodigde sliblaagdikte talud" van 4 januari 2016 wordt nader ingegaan hoe voldaan kan worden aan de geohydrologische isolatie. Hierbij rekening gehouden met het huidige slib niveau en wordt ingegaan op de invloed van de staalslaksteunberm belasting op de permeabiliteit door middel van de SIC test (zie paragraaf 2.2). Aanleg van de staalslaksteunberm is voor de geohydrologische isolatie van het depot gunstig, de eindconsolidatie wordt sneller bereikt, en daarmee ook een lagere permeabiliteit en dus een betere afdichting. Penetratietesten met staalslak op het IJsseloogslib laten zien dat het storten van staalslak geen verdringing van het slib door de individuele staalslakkorrels oplevert. In het veld kan het slib wel worden gesqueezed, d.w.z. zijdelings worden weggeperst. Hydraulisch, of met een grijper, aanbrengen van staalslak is daarmee geen risico. Of een conveyor belt (grotere storthoogte) tot slibverdringing leidt dient nog gevalideerd te worden.

1.5 De chemie: de pH en mogelijke colloïdale deeltjes in het retourwater

Het gebruik van staalslakken is geotechnisch een goed alternatief voor breuksteen of stortsteen. Eerdere toepassing van staalslakken in (zoet)water milieus hadden ongewenste chemische gevolgen. Deze gevolgen betroffen:

- Een hoge pH
- De vorming van colloïdale deeltjes in het oppervlaktewater
- De emissie van zware metalen
- De emissie van zouten, waaronder bariumsulfaat

1.5.1 pH

De pH in de staalslakken kan oplopen tot 12 (ECN, 1995). Deze waarden in oppervlaktewater zijn ongewenst, en kan zorgen voor verwerking van kleimineralen. Doordat de staalslakken in een slibdepot worden toegepast is er een pH stabiliserend effect via de waterfase. Dit effect is via een modelberekening doorerekend.

Tijdens de aanlegfase van het depot loopt de pH in het oppervlaktewater op tot circa 10. Opvallend is dat er zich in het model een sterke gradiënt ontwikkelt tussen de onderkant van de waterkolom (nabij de slibbodem) en de bovenkant. De pH van 10 kan worden verlaagd (tot een pH van circa 7) door een betere menging van de waterkolom.

De verhoogde pH van 10 verdwijnt snel na de aanlegfase van de steunberm, na drie weken is de pH aan de bovenkant van de waterkolom rond de 7.

De pH vormt daarmee een beheersbaar risico voor het retourwater. Van naturen heeft het Ketelmeerwater een pH van 8.0 (<http://live.waterbase.nl>, meetpunt Kampen). Indien de pH in het retourwater één pH eenheid boven deze waarde gekozen wordt (toetswaarde 9.0) kan de pH door menging van oppervlaktewater in het depot hier ook tijdens aanleg van de staalslaksteunberm aan voldoen.

1.5.2 De vorming van colloïdale deeltjes

Het voorkomen van colloïdale deeltjes is niet zozeer een toxisch risico (de meeste colloïdale deeltjes zijn zouten), maar visueel niet aantrekkelijk door de verkleuring van het oppervlaktewater. Er dient voorkomen te worden dat deze deeltjes gevormd worden en het depot verlaten. Modelberekeningen hebben aangetoond dat er geen significante (maximaal 0,00026 µg/l voor aluminiumhydroxide en maximaal 0,0022 µg/l voor bariumsulfaat) hoeveelheden anorganische colloïdale deeltjes het depot via het retourwater verlaten.

1.5.3 De emissie van zware metalen

In deze rapportage wordt niet ingegaan op de emissie van zware metalen. Dit is eerder gedaan in het Deltares rapport "Onderzoek toepassing staalslakken in IJsseloog, A.J. Wijdeveld, project 1210144, 2015".

1.5.4 De emissie van zouten, waaronder bariumsulfaat

De vorming van colloïdale deeltjes raakt nauw aan de emissie van zouten naar oppervlaktewater. In een eerdere Deltares rapportage "Metingen aanvullend onderzoek Averijhavendepot, A.J. Wijdeveld, 1207446" is het overall effect van de emissie van zouten berekend.

Bij de focus op de vorming van colloïdale deeltjes viel op dat de opgeloste barium concentraties hoog waren. Barium komt al in verhoogde concentraties voor op de IJssel. Zie "Waterkwaliteitsrapportage 2010, Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 5 oktober 2011, 9W8228".

Tabel 3.8: Mate van normoverschrijding (toetswaarde/norm) in waterlichaam IJssel, meetpunt Kampen - probleemstoffen

Parameter	Eenheid	Bewerking	KRW Prioritaire stoffen	KRW- fysisch chemisch GEP	KRW Overige relevante stoffen	n = aantal
barium	ug/l	JGM			8,51	12
beryllium	ug/l	JGM			2,72	12
kobalt	ug/l	JGM			1,92	12
koper	ug/l	P90			1,56	12
som benzo(g,h,i)peryleen en indeno(1,2,3-c,d)pyreen	ug/l	JGM	2,06			12
selenium	ug/l	JGM			4,42	6
stikstof	mg/l	ZGM		1,04		7
fosfaat	mg/l	ZGM		1,50		7

Zonder maatregelen om de steunberm na aanleg af te dekken met slib kan het opgeloste bariumgehalte in het retourwater oplopen tot 200 µg/l, 33% boven de MAC-MKN waarde van 148 µg/l. Intensiever contact met slib, door afdekken of door resuspensie en sedimentatie voorkomt dat de barium concentratie de MAC-MKN waarde overschrijdt.

1.5.5 Overall conclusie chemie, aanbevelingen voor Programma van Eisen

De pH en de vorming van colloïdale deeltjes tijdens en na de aanleg van de staalslaksteunberm vormen een goed beheersbaar risico. Indien de maximale pH in het retourwater op 9,5 gesteld wordt kunnen voldoende beheersmaatregelen genomen worden om ook tijdens de aanleg van de steunberm te garanderen dat deze pH niet overschreden wordt.

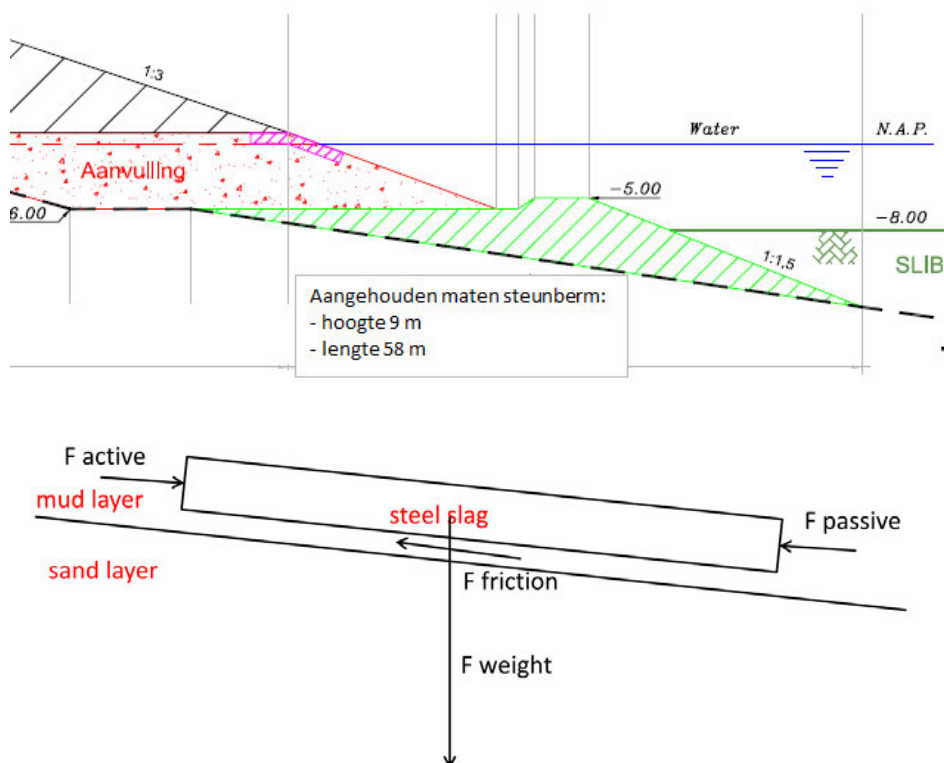
Voor het voorkomen van de vorming van colloïdale deeltjes hoeven geen specifieke voorschriften te worden opgenomen.

2 Het aanbrengen van een staalslaksteunberm op het talud

2.1 Samenvattend, de berekende horizontale afschuiving in het basisscenario

Het aanbrengen van een steunberm op een talud van 1:4 bedekt met slib leidt tot afschuiving. In het basisscenario (huidige situatie depot, aanbrengen in één omloop, geen aanvullende maatregelen) bedraagt de berekende horizontale afschuiving 30 meter.

Figuur 2.1 geeft het indicatieve profiel van de steunberm ($300 \text{ m}^3/\text{m}$), met de ontbinding in krachten.



Figuur 2.1 Indicatief profiel steunberm, op basis waarvan de krachten berekend zijn. De berm in onderste figuur is gebruikt voor de berekeningen en heeft een dikte van 5 meter en een breedte van 60 meter.

De afschuivende kracht van de steunberm bedraagt 633 kN/m (F_{active} & de component langs het talud van F_{weight}). Deze kan worden opgevangen door:

- Frictie en draagkracht slibpakket onder de steunberm (F_{friction})
- Tegenkracht door slib aan de teen van de steunberm (F_{Passive})

De berekeningen (op basis van metingen) tonen aan dat de frictie en draagkracht van het slib onder de steunberm te gering is om de steunberm te stabiliseren. Door afschuiving komt de steunberm dieper in het slib te liggen, en wordt er meer tegendruk opgebouwd. Op basis van het huidige dichtheidsprofiel van het slib is de berekende benodigde extra sliblaagdikte aan de teen van de steunberm 7,5 meter. Dit vertaalt zich in een horizontale afschuiving van 30 meter (talud 1:4).

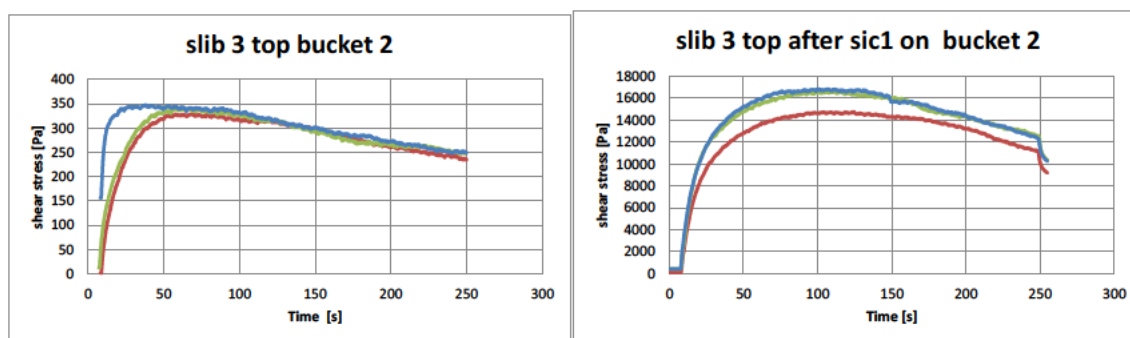
2.2 Frictie op het grensvlak staalslak/slib & effectieve stress in het slib

Om te voorkomen dat de staalslaksteunberm langs het zandtalud afschuift, moet er voldoende wrijving worden gemobiliseerd op het grensvlak langs het talud. Het is hierbij van belang te weten hoe de staalslak korrels in het slib dringen, zodat duidelijk wordt wat er gebeurt op het grensvlak tussen de staalslakken steunberm en het zandtalud. Hier wordt nader op ingegaan in paragraaf 3.2 t.a.v. de belastingsproeven met staalslak.

De staalslak korrels blijken nauwelijks in te dringen (minder dan 5 cm) in het op het talud aanwezige slib, waardoor er een sliblaag tussen de staalslakken en het talud aanwezig blijft, die door het gewicht van de staalslakken zijdelings wordt weggeperst (squeezing). Er blijft na het wegpersen een sliblaag van zeker 30 cm dikte over die langzaam ontwaterd en in dikte afneemt. De sliblaag heeft aanvankelijk een lage sterkte (ca. 300 Pa, bovenin de sliblaag en met 588 Pa/m toenemend met de diepte), wat maakt dat de wrijving te laag is en de staalslaksteunberm nog niet stabiel is. Door het ontwateren (consolidatie) neemt het slib in sterkte toe. Dit is aangetoond op basis van de SIC-proeven, zie paragraaf 3.1. Deze toename in sterkte van het slib geeft een extra wrijvingskracht, waardoor de steunberm stabiel wordt en minder snel afschuift als deze verder wordt belast. Echter de ontwatering van het slib kost tijd (orde enkele jaren).

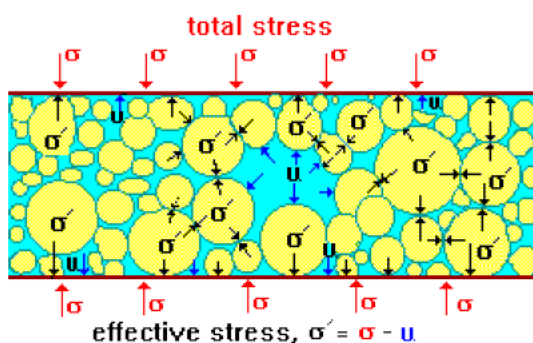
Op de grens tussen de staalslak en het slib wordt in eerste instantie dus geen extra frictie opgebouwd, omdat de sliblaag dan nog zacht is. De shear stress van het ongeconsolideerde slib is te laag, (zie voor voorbeelden rapport: 1220509-000-ZWS-0010-r-Steel Slag Stability - Laboratory and Geotechnical Technical Report). Indien er geen staalslakken worden aangebracht is het redelijk te veronderstellen dat de sterkte in het slib lineair toeneemt met de diepte, zie par. 6.3.1 uit het genoemde Laboratory and Geotechnical Technical Report. Op basis van de vinproeven op het toplaag slib en sonderingen is dit onderbouwd, zie het Laboratory and Geotechnical Technical Report. Deze slibsterkte is niet groot genoeg om te voorkomen dat de steunberm langs het talud over tientallen meters afschuift. Als de sliblaag consolideert onder het gewicht van de staalslakken wordt dit veel gunstiger.

De consolidatie van de sliblaag onder de 5 m dikke berm met staalslakken is nagebootst in de SIC-lab opstelling, zie par. 3.1 voor de resultaten. Figuur 2.22 laat de ontwikkeling van de shear stress zien ten gevolge van het belasten. Deze shear stress is een fractie (ca. 0,25) van de opgebouwde effectieve korrelspanning in het slib.



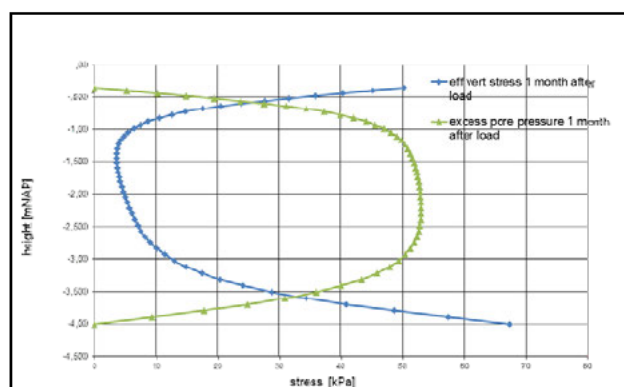
Figuur 2.2 IJsseloog toplaag sedimentgemixed (in Pa) (links), versus de eindsterkte slib na belasten (rechts)

Aanvankelijk (voor consolidatie) heeft het slib onder de steunberm geen voldoende dragend korrelskelet. Bij belasten met σ loopt de wateroverspanning u op, waarbij de toename van de effectieve spanning σ' (zie Figuur 2.3) aanvankelijk klein is.



Figuur 2.3 Effectieve spanning

Figuur 2.4 illustreert de sterkte en de waterspanning 1 maand na het aanbrengen van de 5 m dikke steunberm. De resultaten zijn gebaseerd op de genoemde Seepage Induced Consolidation (SIC) testen, toegepast op zettingsberekeningen bij verschillende belastingen en afschuifscenario's. In Figuur 2.4 is een sliblaagdikte onder de steunberm van 4 meter aangehouden, waarbij verondersteld is dat de rest van het slib in de sliblaag is weggeperst. Dit wordt als realistisch ingeschat, zie het Laboratory and Geotechnical Technical Report.



Figuur 2.4 Effectieve spanning en wateroverdruk over de diepte van een 4 m dikke sliblaag

Figuur 2.4 illustreert dat de ontwatering via de drainerende boven- en onderkant van het slibpakket verloopt, daar neemt de effectieve sterkte na 1 maand toe.

De poriewaterdruk in het midden van het slibpakket loopt op, waarna het slib gaat ontwateren en de sterkte toeneemt. Het duurt 5 jaar totdat de consolidatie van deze 4 m dikke sliblaag te einde is, zodat dan pas de maximale schuifsterkte wordt bereikt.

Indien de steunberm afschuift komt de steunberm dieper in het slib te liggen, en biedt de sliblaag aan de teen van de steunberm weerstand om de steunberm uiteindelijk te stabiliseren. Om de afschuiving te stoppen is een tegenkracht aan de teen van de steunberm van 633 kN/m (of 64,548 kgf/m) nodig zolang het slib onder de steunberm onvoldoende sterk is. Dit komt met het huidige dichtheidsprofiel van het IJsseloog slib overeen met een sliblaagdiepte aan de teen van de steunberm van 9 meter. Zoals nu voorzien is de sliblaagdiepte bij het aanbrengen 1,5 meter. Dit vertaalt zich in een gewenste toename van de sliblaagdiepte van 7,5 m verticaal, waarbij is verondersteld dat de berm langs een talud van 1:4 afschuift, zodat dus een afschuiving van 30 meter langs dit talud optreedt. Hierbij is verondersteld, zoals eerder aangegeven, dat sterkte van het slib lineair toeneemt met de diepte in het slib. Er is dan nog geen rekening gehouden met de consolidatie onder het gewicht van de staalslakken.

2.3 Aanbrengen deklaaggrond

De afschuiving is berekend zonder rekening te houden met de deklaaggrond/aanvullaag. Het aanbrengen van de deklaaggrond (maximaal 5 meter in dikte) zal naar verwachting niet tot extra afschuiving leiden, mits er vijf jaar gewacht wordt na het aanbrengen van de staalslaksteunberm en mits de berm dan dieper dan circa 5 m in het slib ligt. In vijf jaar is de consolidatie van het slib onder de steunberm volledig (uitgaande van een maximaal 4 m dikke sliblaag onder de steunberm), de poriewateroverdruk is verdwenen. Dit vergroot de draagkracht van het talud.

Een tweede mechanisme wat gunstig is om de afschuiving te beperken is dat een deel van het volume van het verdrongen slib als een berg voor de teen van de steunberm ligt. Dit vergroot de passieve tegendruk. Omdat de hellingshoek van dit slib niet op voorhand te bepalen is (en daarmee ook niet de exacte hoogte van de berg) is hier geen rekening mee gehouden in de berekeningen.

De optelsom van meer draagkracht door consolidatie en extra slibhoogte door opstuwing is geeft voldoende vertrouwen om verdere afschuiving (verder dan 30 meter) na aanbrengen van de steunberm als onwaarschijnlijk te bestempelen, mits er genoeg tijd wordt gelaten voor consolidatie en de staalslak juist is aangebracht. Met monitoring moet nagegaan worden wat het penetratie en afschuivingsgedrag van de staalslakberm is, zodat er voldoende vertrouwen ontstaat in de daarop volgende bouwfasen.

2.4 Maatregelen om afschuiving te voorkomen

Het afschuiven van de steunberm is geen falen of bezwijken, maar een te voorzien zettingsproces ten gevolge van het op een stijl talud plaatsen van een groot gewicht met een geringe bodemfrictie. Ook bij gebruik van puin of stortsteen zal een vergelijkbare afschuiving plaatsvinden. Er zijn wel maatregelen te nemen om de afschuiving te beperken. Niet alle maatregelen zijn in detail doorgerekend, daarvoor zijn er nog teveel onzekerheden over de wijze van aanbrengen en de condities van aanbrengen. Wel zijn de oplosrichtingen verkend.

Voor de steunberm varianten die steunen op de omloop op -6,0 m NAP (direct op zand) geldt dat de steunberm geheel niet afschuift, mits geen bermmateriaal op de dikke sliblaag wordt geplaatst. Dit gaat echter wel ten koste van het land areaal waarmee het eiland uitgebreid kan worden en het volume grond dat geborgen kan worden.

2.4.1 Aanbrengen onder een minder stijl talud (1:2 i.p.v. 1:1.5).

Een talud van 1:2 zou bij een gelijk volume per m tot een verlaging van de steunberm met 1,2 meter leiden. De afschuiving wordt hierdoor niet verkleind.

2.4.2 Aanbrengen van extra slib

Het aanbrengen van 0,8 miljoen m³ Averijhaven slib op een oppervlak van 620.000 m² leidt tot een gemiddeld slibpeilverhoging van 1,3 meter. Door het slib zoveel mogelijk tegen het talud aan te leggen kan er extra slibhoogte gegenereerd worden, naar schatting 4,6 m toename in slibdikte. De slibhelling bij aanbrengen via verpompen bedraagt circa 1°. Op een depotstraal van 444 meter levert dit een maximale slibhoogte op van plus 1,9 meter ten opzichte van het huidige slibpeil (60 centimeter meer dan het gemiddelde slibpeil door het aanbrengen van het Averijhaven slib). Het slibpeil in IJsseloog bij aanvang van de werkzaamheden Averijhaven gestegen van -9,0 m NAP (IJsseloog jaarrapport 2014) tot -8,0 m NAP.

Dit slib wordt bovendien aangebracht op het talud, waardoor de sliblaagdikte een grotere tegenkracht kan uitoefenen op de staalslaksteunberm. De afschuiving kan hierdoor beperkt worden tot circa 20 meter, mits de staalslakken voldoende diep wegzakken in het slib.

2.4.3 Gefaseerd aanbrengen van de steunberm (meerdere rondgangen).

De tegendruk aan de teen is nodig omdat het slib onder de steunberm momenteel onvoldoende sterk is, waardoor een groot deel van het gewicht van de steunberm door het slib aan de teen van de steunberm opgevangen moet worden. Indien het slib consolideert neemt het talud een deel van de draagkracht over door de toename van de effectieve sterkte van het slib (zie Figuur 2.4). Figuur 2.2 laat bovendien zien dat de slibsterkte ongeveer een factor 100 toeneemt bij toenemende consolidatie. Dit vertaalt zich in een afnemende behoefte aan tegendruk.

Tabel 2.1 Resultaten voor afschuiven staalslakken berm, zie ook rapport: 1220509-000-ZWS-0010-r-Steel Slag Stability - Laboratory and Geotechnical Technical Report.

Scenario	Benodigde tegenwerkende kracht (kN)	Nut consolidatie tijdens aanleg berm	Afschuiving langs talud van 1:4 (m), zonder consolidatie
1 rondgang	633 kN	Weinig nut, duurt te lang	30 m
3 rondgangen	136 kN per rondgang	Consolidatie in periode tussen rondgangen	10 m per run (als ongunstig scenario)

Met een omlooptijd van 100 dagen en 3 rondgangen neemt de benodigde tegendruk af tot maximaal 408 kN. De steunberm afschuiving wordt hierdoor beperkt tot minder dan 30 meter.

2.4.4 Technische maatregelen om de steunberm of het slib te stabiliseren

Op basis van de hiervoor beschreven opties zijn er maatregelen die bij kunnen dragen aan de stabilisatie van de steunberm:

- Tijdelijke staalwand op +/- 50 meter van de huidige omloop. Hierdoor kan er meer slib opgespoten worden op het talud. Na consolidatie (van 4 m slib in circa 5 jaar) kan de staalwand verwijderd worden.
- Voor het creëren van effectieve sterkte kan het slib ontwaterd worden. Voor het nog aan te brengen slib uit de Averijhaven kan dit door:
 - Het toevoeging van vlokculanten.
 - Het omploegen na stort om de ontwatering te versnellen (de geploegde voren kennen een hoge permeabiliteit).
 - Vergroten van het potentiaalverschil (hoger depot peil).
 - Bijmenging van zand.
- Stort staalslak tussen twee staalwanden, om zo een maximale druk op te bouwen waardoor de slak in het slib dringt, en het slib versneld consolideert.

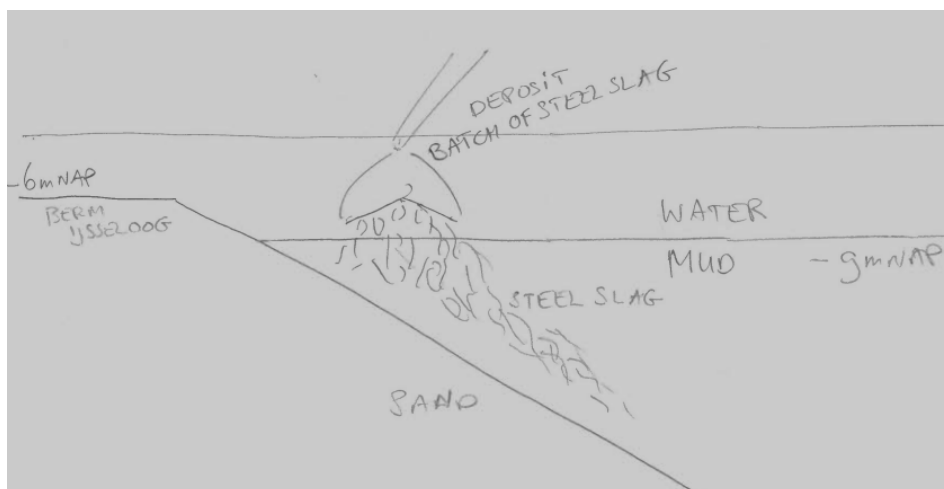
Technische oplossingen hebben niet de voorkeur. Naast kosten brengt het extra onzekerheden met zich mee over de faalkans, tijdsduur van de maatregelen en neveneffecten. Van de omschreven opties is omploegen relatief goedkoop en zonder aanvullende risico's.

2.5 De vorm van de steunberm en de wijze van aanbrengen

De vorm van de steunberm is niet kritisch. Elke vorm waarmee een lichaam gecreëerd wordt dat een afschuifkracht van 633 kN/m (of 64,548 kgf/m) kan weerstaan voldoet om in de afwerkfase een deklaaggrond van 5 meter op aan te brengen.

Wel is de randvoorwaarde dat de steunberm een voldoende hoge belasting op het slib heeft opgeleverd zodat de steunberm diep in het slib ligt, en dat de effectieve sterkte zodanig is opgelopen dat er een dragend slibskelet is ontstaan onder de steunberm. Een talud van minimaal 1:2 is daarom gewenst.

Gezien het risico op afschuiving wordt afgeraden om de steunberm met kiepauto's aan te leggen. Een lopende band of storten met een grijper (vanaf de kant of op een ponton) verdienen de voorkeur, zie Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Schets mogelijke vorm staalslaksteunberm bij plaatsen met een grijper.

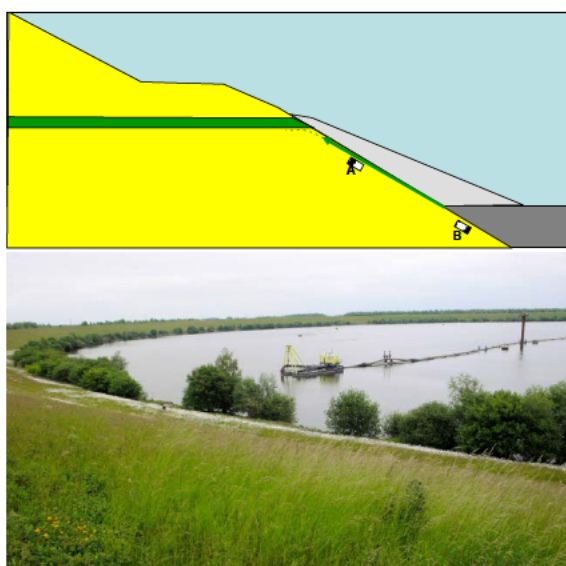
2.6 Alternatieve materialen voor de steunberm

De steunberm kan ook met andere materialen aangelegd worden. Er zijn een aantal specifieke voordelen om dit met staalslakken te doen:

- De hoge bulkdichtheid van 3.300 kg/m^3 is gunstig voor de slib indringing en versnelde consolidatie. Alternatieve materialen met een lagere bulkdichtheid functioneren minder goed. Dit vertaalt zich in de taludhelling (flauwer dan 1:2 dus breder) en de benodigde hoogte van de steunberm om voldoende druk op te bouwen (hoger, meer stort volume).
- Het werken met een niet vormgegeven materiaal (delen $< 20 \text{ mm}$) maakt hydraulisch plaatsen mogelijk. Veel van de benodigde infrastructuur is al op het depot aanwezig. De staalslak heeft bij aanbrengen materiaal technisch de juiste eigenschappen om als niet vormgegeven bouwstof met een scherp (1:2) talud aangebracht te worden. Op termijn van tientallen jaren kan zich mogelijk een monoliet vormen (zie de chemie van het systeem). Dit biedt voor deze toepassing extra zekerheid omdat dit monoliet verkit met de ondergrond gevormd wordt en impermeabel is. De emissies vanuit het depot naar grond- en oppervlaktewater nemen af.

3 De geohydrologische isolatie op het talud

De geohydrologische isolatie van het depot wordt in hoofdzaak gevormd door het slib dat al in het depot geborgen is. Echter op basis van het slibniveau 2014 was er een deel van het talud niet met slib bedekt (tussen het slib peil van -9 m NAP en de afdichtende laag op -8.0 m NAP, met een talud van 1:4 betreft dit een ring met een diameter van circa 4 meter). Deze ring is in 2015 dichtgesproeid met slib (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Schets openstaande deel talud waar slib op is aangebracht.

Er zijn ongeroerde monsters in kolommen gestoken, waarop doorlatendheidsproeven zijn uitgevoerd, zie het rapport 1220509-000-ZWS-0010-r-Steel Slag Stability - Laboratory and Geotechnical Technical Report. De resultaten staan in tabel 3.1. Er is geen nauwkeurige meting van de gemiddelde dichtheid beschikbaar waarbij deze doorlatendheden zijn gemeten. De dichtheid is minstens 1300 kg/m³.

Tabel 3.1 Permeability values from the permeability tests on the columns

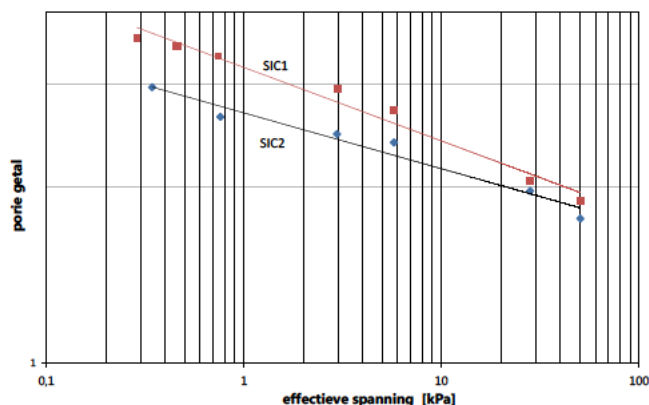
Kolom #	Locatie	Dikte sliblaag [m] aan einde proef	K-waarde [m/dag]	K-waarde [m/s]
1	3B	0,17	1.51E-03	1.75E-08
2	4A	0,2	1.35E-03	1.57E-08
4	1C	0,2	2.89E-03	3.34E-08
5	4C	0,12	1.13E-02	1.31E-07
7	1A	0,32	1.34E-04	1.55E-09
8	2C	0,12	1.40E-03	1.62E-08

De metingen uit tabel 3.1 kunnen gebruikt worden op de hydraulische weerstand van de in-situ sliblaag op het hogere deel van het IJsseloog talud te bepalen.

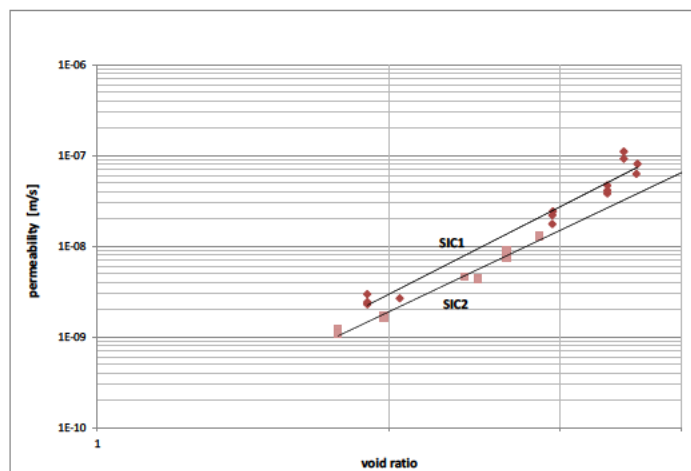
3.1 SIC resultaten

De resultaten uit beide SIC-proeven staan in figuur 3.2.

(a)



(b)



Figuur 3.2 Resultaten met fits op dubbel log schaal uit beide SIC-proeven, met (a) de relaties voor effectieve spanning en (b) de relaties voor de doorlatendheid. Het laagste poriegetal is bij een bovenbelasting van 50 kPa. Void ratio = poriegetal = (volume water)/(volume vaste stof).

Tabel 3.2 Schuifsterkte (maximum) met vin-proef gemeten op het IJsseloog slib voor en na beide SIC-proeven.

Sample	Before SIC [kPa]	After SIC [kPa]
SIC1	0.35 (@ e = 4.10)	14 - 17 (@ e = 2.05)
SIC2	0.2 (@ e = 4.77)	13 - 18 (@ e = 2.12)

3.2 Belastingsproeven met staalslak

De kolommen met ongeroerde monsters zijn, nadat de doorlatendheidsproeven waren uitgevoerd, belast met een laagje staalslakken met hierbovenop een bovenbelasting van 50 kPa, zijnde een 5 m dikke laag staalslakken (met het ondergedompelde gewicht in het slib).

Door middel van waterspanningsmetingen is nagegaan of de zetting was voltooid. Aan het einde van de proeven is de schuifsterkte over de hoogte van de gecompriëerde sliblaag gemeten. De resultaten staan in tabel 3.3. De gemeten waarden sluiten goed aan bij de gemeten schuifspanningen aan het einde van de laatste 50 kPa laststrap in de SIC-proeven, zie tabel 3.2.

Daarnaast is er gekeken naar de indringing van de staalslakkorrels in de sliblaag.

De staalslak korrels penetreren maximaal 5 cm in het slib, zie figuur 3.3. Dit volgt uit inspectie van het sliboppervlak nadat de grootste staalslakkorrels (die het meest indringen) waren verwijderd. De resterende ongepenetreeerde dikte van de sliblaag was minstens 5 cm, terwijl de laagdikte aan het einde van de doorlatendheidsproeven varieerde van 12 tot 32 cm.

Tabel 3.3 Resultaten uit vinproeven aan einde van de belastingsproeven met staalslakken

Kolom	Position	Depth [cm]	Peak [kPa]	Remoulded [kPa]
3A	1	3	20	5
3A	1	6	25	5
3A	2	3	16	6
3A	2	3	-	-
3A	2	6	-	3
3B	1	3	11	4
3B	1	6	10	4
3B	2	3	13	4
3B	2	6	12	5
3B	2	9	-	4
4A	1	3	18	8
4A	1	6	16	7
4A	2	3	19	7
4A	2	6	-	-
4A	3	3	21	12
1C	1	3	6	2
1C	1	3	5	2



Figuur 3.3 Detail van het oneffen sliboppervlak nadat aan het einde van de test de staalslakken zijn verwijderd..

4 De chemie: de pH en mogelijke colloïdale deeltjes in het retourwater

Staalslakken bevatten veel calciumhydroxide ($\text{Ca(OH)}_{2(s)}$), ook wel Portlandite genoemd. Calciumhydroxide kan als alternatief voor calciumoxide ($\text{CaO}_{(s)}$) dienen in Portland cement. Om deze reden is staalslak een goede vervanger voor natuurlijke kalksteenafzettingen zoals mergel.

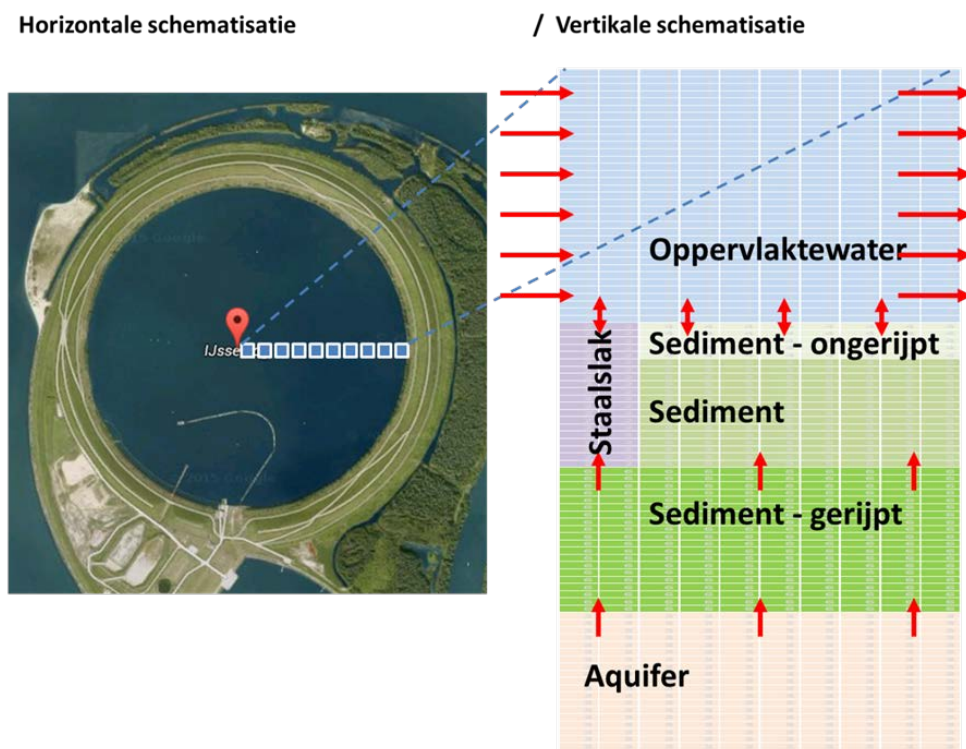
De aanwezigheid van calciumhydroxide in staalslak zorgt er echter ook voor dat de pH in het poriewater op kan lopen tot 14, en via uitwisseling met het oppervlaktewater tot een sterk verhoogde pH in het depot en retourwater kan leiden. Niet alleen de pH verandert, de hoge pH verandert de stabiliteit van een aantal (klei)mineralen en kan in oppervlaktewater leiden tot de vorming van colloïdale deeltjes (een (witte) vertroebeling)



Figuur 4.1 Voorbeeld van dosering aluminiumhydroxide aan oppervlaktewater en mergelgroeve (Sint Pietersberg) met colloïdale deeltjes in het water

Vanwege de potentiële hoge pH in oppervlaktewater (toxisch) en vanwege het mogelijk vormen van colloïdale deeltjes van elementen zoals aluminiumhydroxide en bariumsulfaat is het momenteel niet toegestaan om staalslakken te gebruiken in systemen met een geringe pH buffercapaciteit. In het Besluit bodemkwaliteit voor het nuttig toepassen van staalslakken is dit vertaald naar hergebruik in systemen met een mariene invloed (hoge verversing door getij, hoge alkaliteit in zeewater zorgt voor pH buffering), en een verbod in zoetwater. Echter, in een depot is naast de staalslak een groot oppervlak met slib aanwezig. Dit slib wisselt eveneens uit met de waterkolom. Het depot kan daarom ook als een goed gebufferd systeem worden beschouwd, waarin staalslakken zonder risico op een verhoogde pH en/of colloïdale deeltjesvorming kan worden toegepast.

Om dit aan te tonen is een geochemisch model opgezet dat uitwisselt met het grond- en oppervlaktewater. Dit model representeert een dwarsdoorsnede door het depot (de raai vanuit de kade tot in het midden), waarbij zowel het oppervlaktewater, de staalslakken, het aanwezige sediment en de grondwater aquifer beschouwd wordt.



Figuur 4.2 2DV schematisatie depot

De opzet, schematisatie en samenstelling van dit model is opgenomen in de bijlagen.

Van belang is dat:

- Het model gaat uit van een niet met slib afgedekte staalslak steunberm, 20% van het depot staat in contact met de staalslak.
- Het model rekening houdt met complexe chemische omzettingen die tot een pH verandering en colloïdale deeltjesvorming kunnen leiden.
- De initiële samenstelling van de staalslak is gebaseerd is op de originele samenstellingsgegevens uit de Averijhaven (ECN, 1995)
- Het slib is het huidige IJsseloog sediment.
- Het model voldoende verfijnd is om de uitwisseling tussen staalslak en oppervlaktewater en sediment en oppervlaktewater te beschouwen
- De beschouwde periode 1 jaar is, dit omvat de voorziene aanlegfase.

Om de invloed van zaken zoals verblijftijd (door het niet uitlaten van retourwater), afdekken van de staalslak met slib, de huidige gemeten calciumhydroxide gehalten in de staalslak (validatie op basis van metingen aan het materiaal zoals het er nu (medio 2015) bij ligt) en de periode na aanleg van de steunberm (10 jaar horizon) te onderzoeken zijn een aantal scenarioberekeningen uitgevoerd.

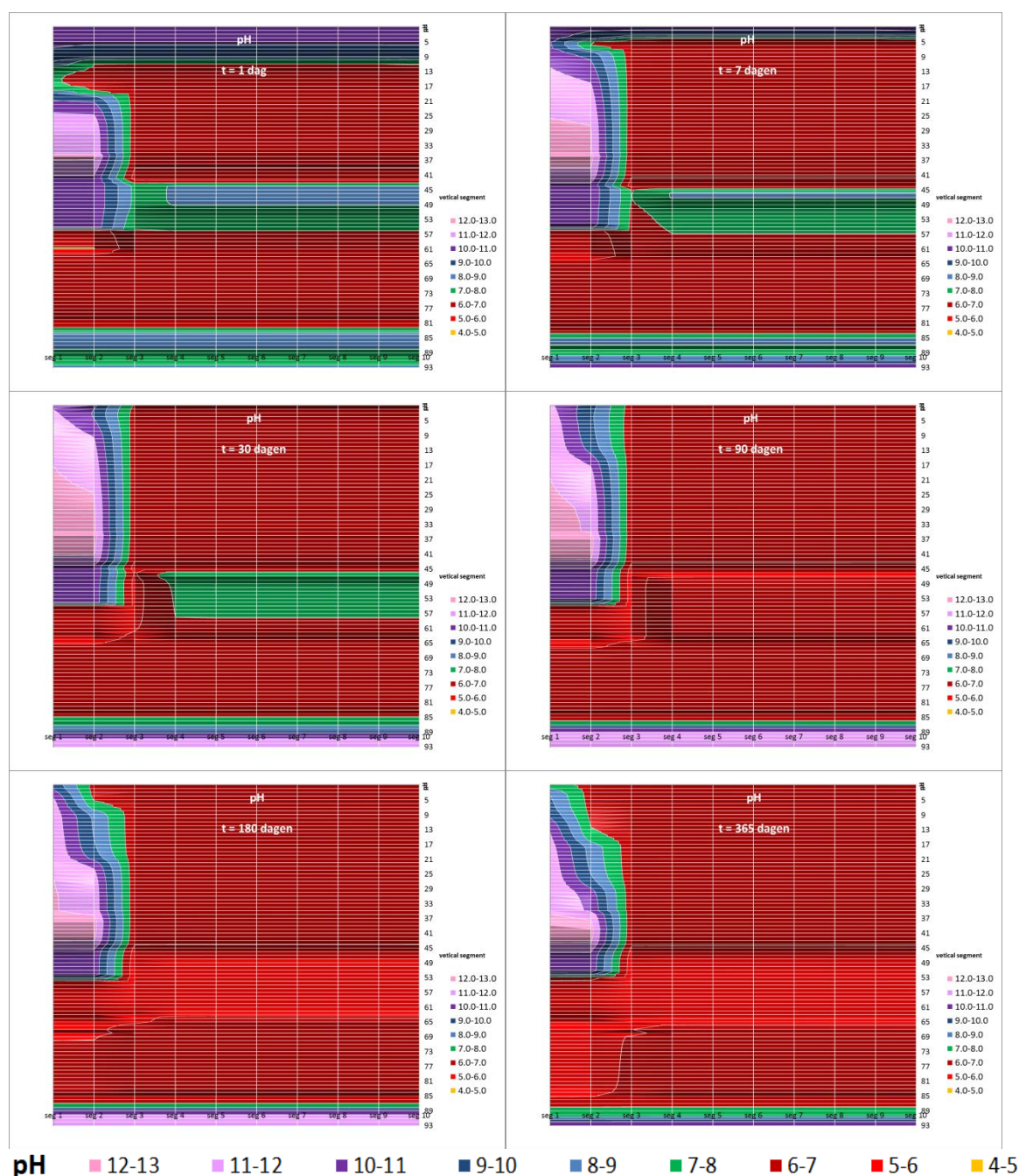
Scenario's:

- Afdekken van de staalslaksteunberm met slib, 50% en 100% (10 en 0% depot opp. staalslak).
- Uitgaan van huidige (2015) samenstelling staalslak, bemonsterd op Averijhaven.
- Veranderen van stromingspatroon oppervlaktewater, kortere contacttijd.
- Langere verblijftijd oppervlaktewater depot, meer oplading.
- Top 3 meter sediment afkomstig uit de Averijhaven (hoger zoutgehalte).
- Beschouwen effecten na aanleg, berekening voor een periode van 10 jaar.

Details over de laagverfijning, schematisatie en chemische samenstelling van het model staan in de **bijlage**.

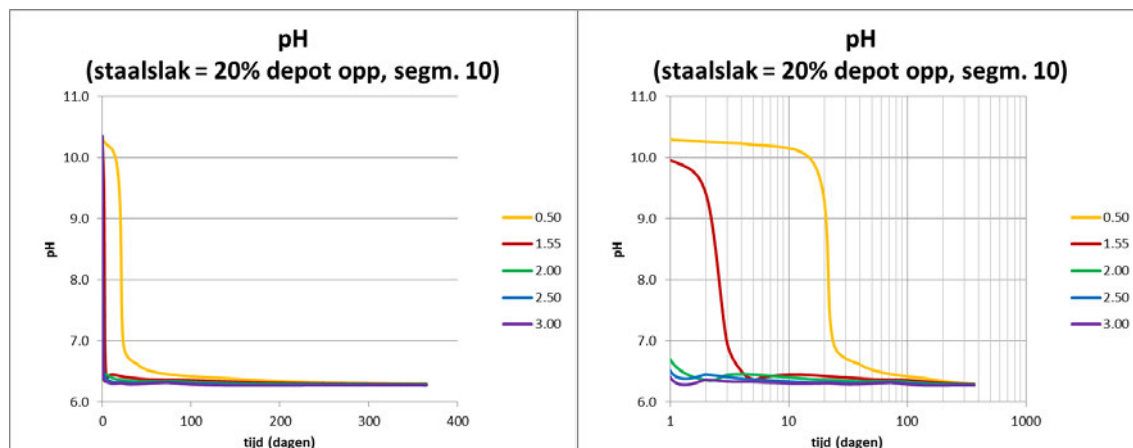
4.1 pH

In Figuur 4.3 is een zetal snapshots weergegeven in de tijd (in dagen) van het pH verloop na aanbrengen van de staalslak (zie het 2DV schema in Figuur 4.2, het oppervlaktewater stroomt van links naar rechts in het model). T=1 dag is representatief voor de aanlegfase.



Figuur 4.3 Basisscenario, de pH in het 2DV model van t=1 tot t=365 dagen

Figuur 4.4 gaat in op de pH van het retourwater als functie van de water diepte (tot 3 meter) in de tijd (in dagen).



Figuur 4.4 pH in het retourwater, tijdschaal lineair (links) en logaritmisch (rechts)

Invloed scenario's op de pH van het retourwater

Het effect van de verschillende scenario berekeningen op de pH van het retourwater is gering. De pH blijft tijdens de aanbrengfase en kortstondig daarna (circa 3 weken) hoog (~10) in de bovenste halve meter van de waterkolom. Hoe dieper in de waterkolom hoe sneller de uitwisseling met het slib de pH stabiliseert (~ 6.5).

Conclusie met betrekking tot de pH

De pH van het retourwater wordt beïnvloed tijdens het aanbrengen van de staalslak, maar enkele weken (~3) na de aanleg is het pH effect op het oppervlaktewater nagenoeg verdwenen.

Tijdens en in de eerste drie week na het aanbrengen van de staalslak is de pH van de bovenste meter van het oppervlaktewater rond de 10.3. Tussen de 1 en 3 meter diepte is de pH van het oppervlaktewater (ook tijdens het aanbrengen) beïnvloed door de uitwisseling met het slib (pH rond de 6.5).

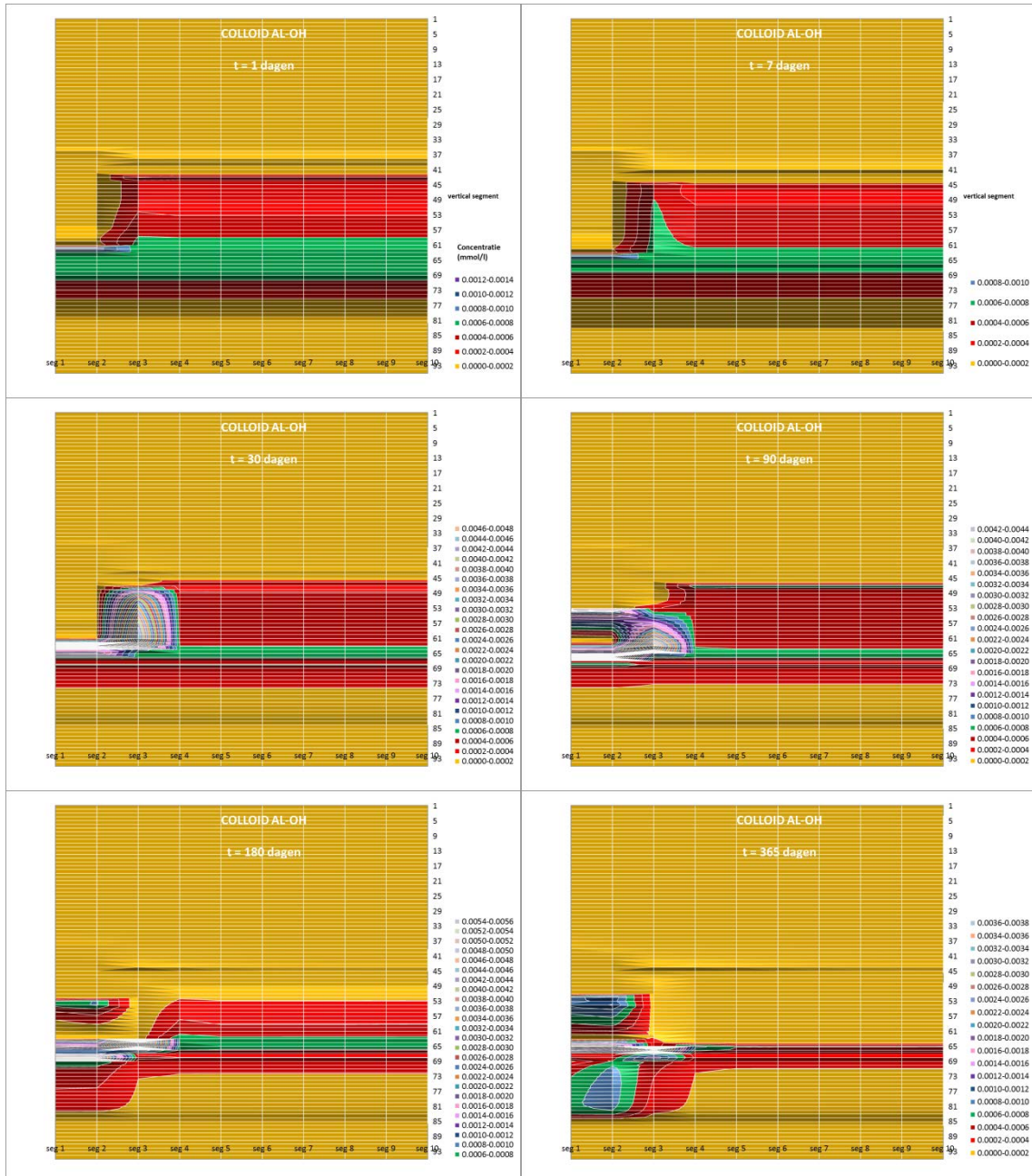
4.2 Colloïdale deeltjes

Anorganische colloïdale deeltjes kunnen gevormd worden ten gevolge van de emissie van zouten door (een combinatie van) verandering van de pH, de redox potentiaal of de saliniteit van het water. Hoewel de meeste colloïdale deeltjes niet toxisch zijn, kunnen ze door hun oplosbaarheid en groot specifiek oppervlak zware metalen binden en zo voor co-transport van contaminanten zorgen. Daarnaast zorgen colloïdale deeltjes voor een vertroebeling van de waterkolom, wat visueel niet aantrekkelijk is. In de Bijlage staan de colloïdale deeltjes die beschouwd zijn.

De meest relevantie colloïdale deeltjes die gevormd worden zijn:

- Aluminiumhydroxide
- Bariumsulfaat

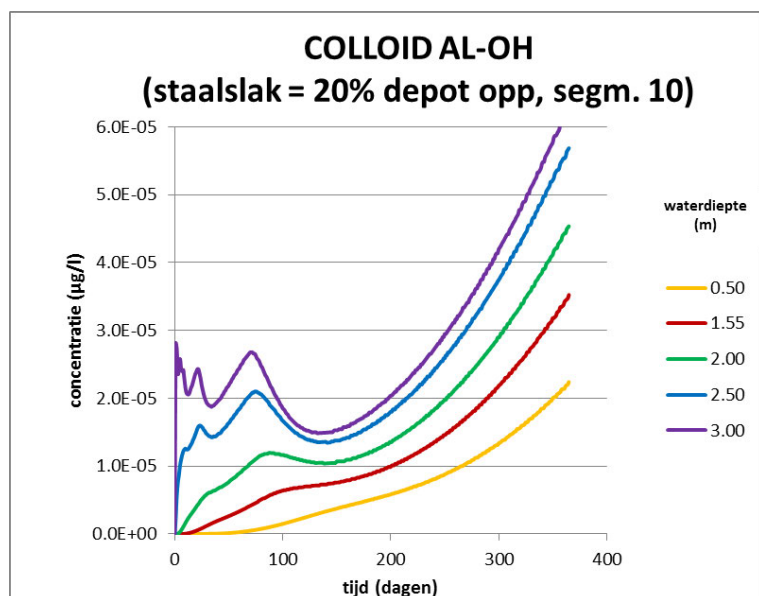
4.2.1 Aluminiumhydroxide



Figuur 4.5 Basisscenario, colloïdaal aluminiumhydroxide in het 2DV model van $t=1$ tot $t=365$ dagen

Figuur 4.5 (zie schema Figuur 4.2, eenheid mmol/l) laat zien dat het circa 30 dagen duurt voordat zich colloïdaal aluminiumhydroxide vormt. De hoogste concentraties komen voor in de grenslaag tussen het slib en de staalslak, de concentratie in het oppervlaktewater is relatief laag.

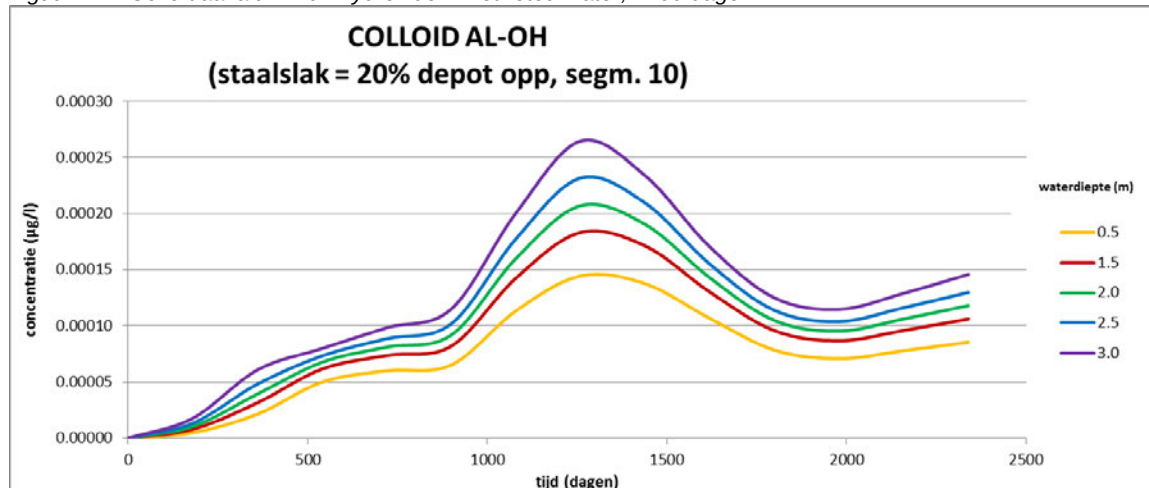
Het tijdschaal effect, en de relatief verhoogde concentraties colloïdaal aluminiumhydroxide wordt ook aangetroffen in de concentraties in het retourwater. In Figuur 4.6 wordt de retourwaterconcentratie (in $\mu\text{g/l}$) weergegeven.



Figuur 4.6 Colloïdaal aluminiumhydroxide in het retourwater

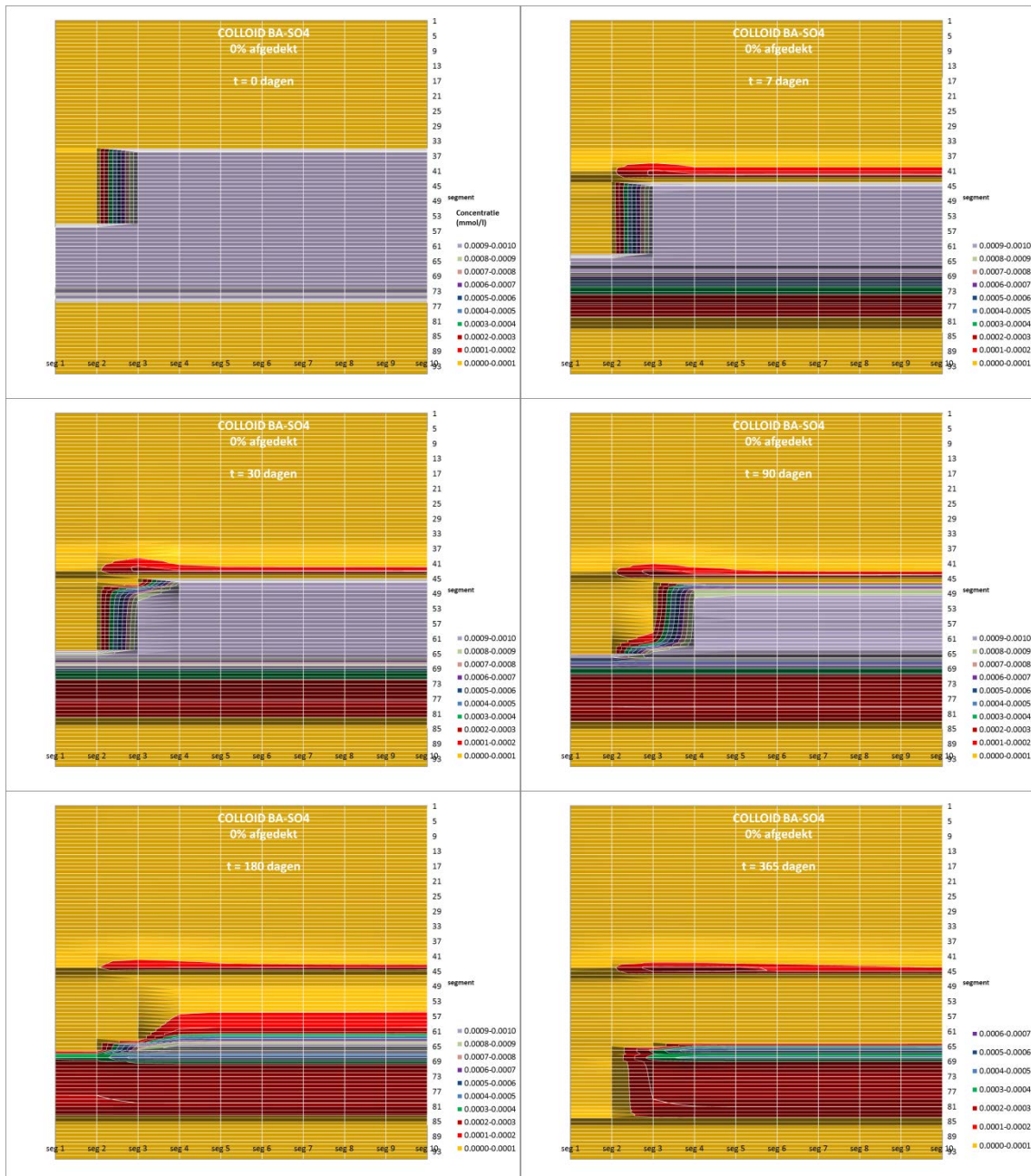
Omdat de aluminiumhydroxide concentratie nog oploopt na 360 dagen is een periode van 2400 dagen doorgerekend (Figuur 4.7).

Figuur 4.7 Colloïdaal aluminiumhydroxide in het retourwater, 2400 dagen



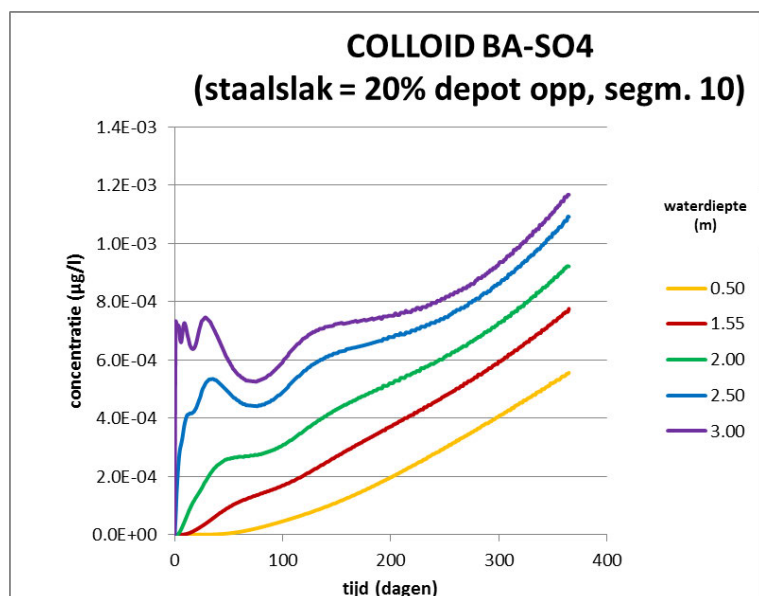
De concentratie colloïdaal aluminiumhydroxide loopt op tot 3.5 jaar na aanbrengen van de staalslaksteunberm. De concentratie in het retourwater is echter laag (maximaal 0,00026 $\mu\text{g/l}$), waardoor vertroebeling niet optreedt.

4.2.2 Bariumsulfaat



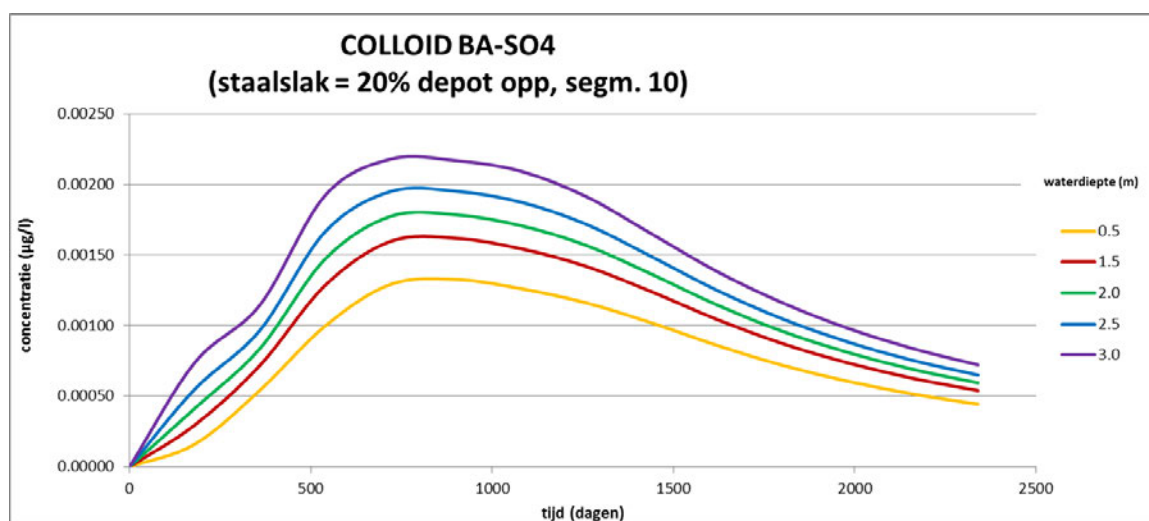
Figuur 4.8 Basisscenario, colloïdaal bariumsulfaat in het 2DV model van t=1 tot t=365 dagen

Colloïdaal bariumsulfaat komt in eerste instantie vooral voor in het sediment. Hoewel de concentraties barium in de staalslak hoger zijn dan in het sediment is voor de vorming sulfaat nodig. Dit wordt vooral gevormd op het grensvlak tussen het sediment en de waterkolom. Dit is de reden dat er een band gevormd wordt op dit grensvlak. Net zoals bij colloïdaal aluminiumhydroxide zijn de concentraties nabij de bodem (op 3 meter diepte) hoger dan nabij het oppervlak van de waterkolom (op 0.5 meter diepte).



Figuur 4.9 Colloïdaal bariumsulfaat in het retourwater

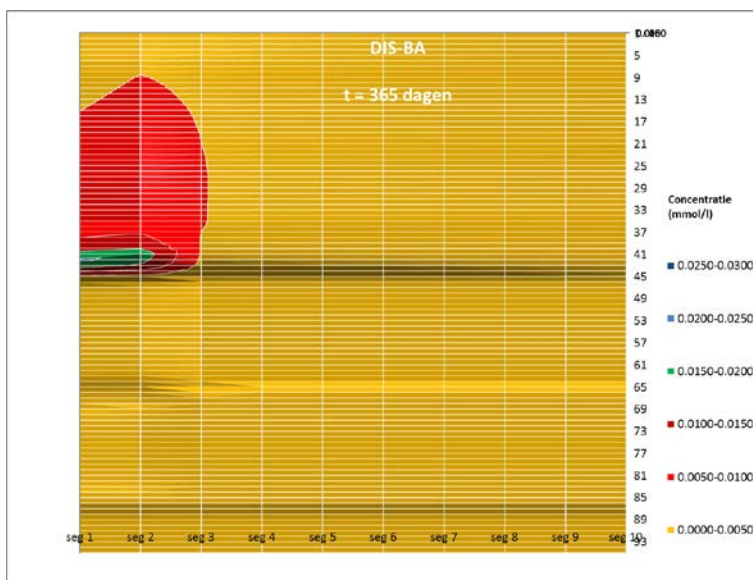
Ook de bariumsulfaat concentratie neemt nog toe na 1 jaar. Er is een periode van 2400 dagen doorgerekend (Figuur 4.10).



Figuur 4.10 Colloïdaal bariumsulfaat in het retourwater, 2400 dagen

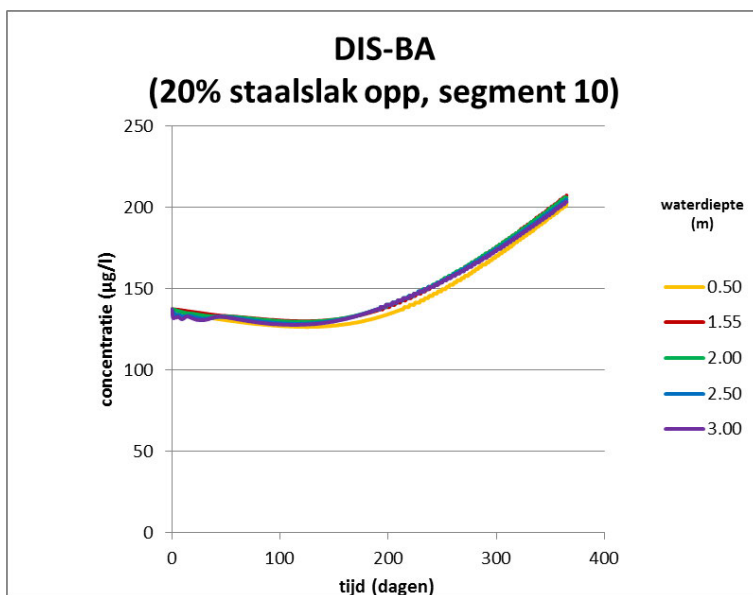
Een colloïdaal bariumsulfaat concentratie van 0,0022 $\mu\text{g/l}$ in het retourwater na 2 jaar (maximum concentratie) leidt niet tot vertroebeling.

Zorgwekkender dan de colloïdaal bariumsulfaat concentratie is de opgeloste bariumconcentratie. Deze loopt op tot 0.025 mmol/l (3.430 µg/l) op de grens tussen de staalslakken en het oppervlaktewater.



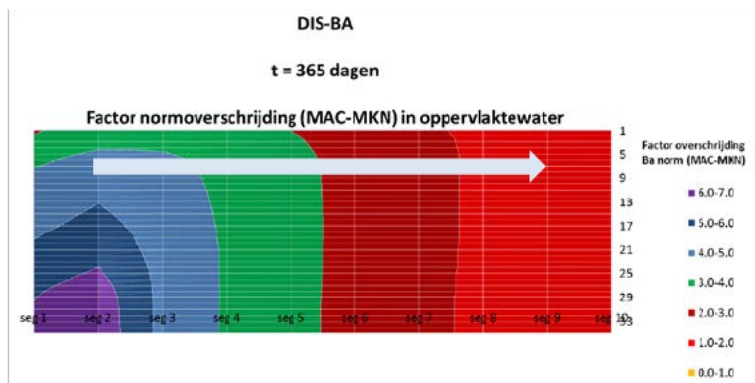
Figuur 4.11 Basisscenario, opgelost barium in het 2DV model op t=365 dagen

In het retourwater lopen de concentraties barium op tot 200 µg/l, zie Figuur 4.12.



Figuur 4.12 Opgelost barium in het retourwater

De oppervlaktewater norm voor barium ligt op 148 µg/l (MAC-MKN, RIVM "Risico's van stoffen", <http://www.rivm.nl/rvs/>, geraadpleegd op 09-12-2015).



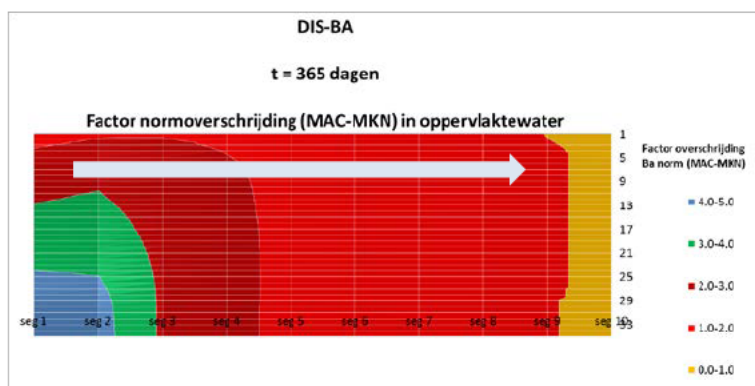
Figuur 4.13 Factor normoverschrijding opgelost barium in oppervlaktewater depot, pijl geeft stroomrichting

Invloed scenario's op de barium concentratie in het retourwater

Gezien de geringe hoeveelheid colloïdaal bariumsulfaat ten opzichte van opgelost barium heeft de scenario analyse zich gericht op opgeloste concentratie barium.

Opvallend is dat bij het hanteren van de huidige (2015) samenstelling van de staalslakken de barium concentraties hoger oplopen (tot 300 µg/l in het retourwater). De reden is dat de pH lager is.

Afdekken met slib heeft een positief effect. Bij 100% afdekken blijft de bariumconcentratie in het retourwater beneden de MAC-MKN waarde, zie Figuur 4.14.



Figuur 4.14 Factor normoverschrijding opgelost barium in oppervlaktewater bij afdekken staalslaksteunberm met slib, oranje is beneden de MAC-MKN waarde voor barium.

Conclusie met betrekking tot colloïdale deeltjes

In het retourwater zullen zich geen colloïdale deeltjes bevinden.

Wel is de gemodelleerde opgeloste concentratie barium in het retourwater boven de MAC-MKN waarde. Het betreft een modelresultaat, geen meetresultaat. Bovendien is het een zeer complex model, dat primair bedoeld is om inzicht te geven in de processen die de oppervlaktewaterkwaliteit beïnvloeden. Of normoverschrijding (35%) in het retourwater ook daadwerkelijk plaatsvindt is onzeker. Wel wordt aanbevolen om de barium concentratie in het retourwater tijdens en na de aanleg van de staalslakdam te volgen, en te verkennen welke maatregelen genomen kunnen worden om de barium concentratie terug te dringen.

A Bijlagen

A.1 Modelling van de pH en colloïdale deeltjes, vorming van colloïdale deeltjes

De vorming van colloïdale deeltjes is geen standaard onderdeel van het gebruikte geochemisch model CHARON. Wel berekend CHARON het in oplossing gaan of vormen van minerale fasen. Als het vormen van mineralen in het oppervlaktewater plaatsvindt kan dit beschouwd worden als een colloïdaal deeltje. De mineralen die op deze wijze kunnen bijdragen aan de colloïdale fractie zijn:

AL(OH)₃ BASO₄S CASO₄S CACO₃C CAO₂S FESS FECO₃S WUSTIT FEO
MGOH₂S MGCO₃S MGO MNSS MNO SILICA Ca₂Si MG-FE MN-FE

De vorming van deze mineralen is afhankelijk van de thermodynamische stabiliteit, waarbij de invloed van de pH door het model wordt meegenomen. Aanvullend op de vorming van deze thermodynamische evenwichtsmineralen is met behulp van het oplosbaarheidsproduct voor de zouten AL(OH)_{3(s)} en BA(SO₄)_(s) een berekening uitgevoerd of deze zouten tot supersaturatie (en daarmee de vorming van een colloïde deeltje) kunnen leiden.

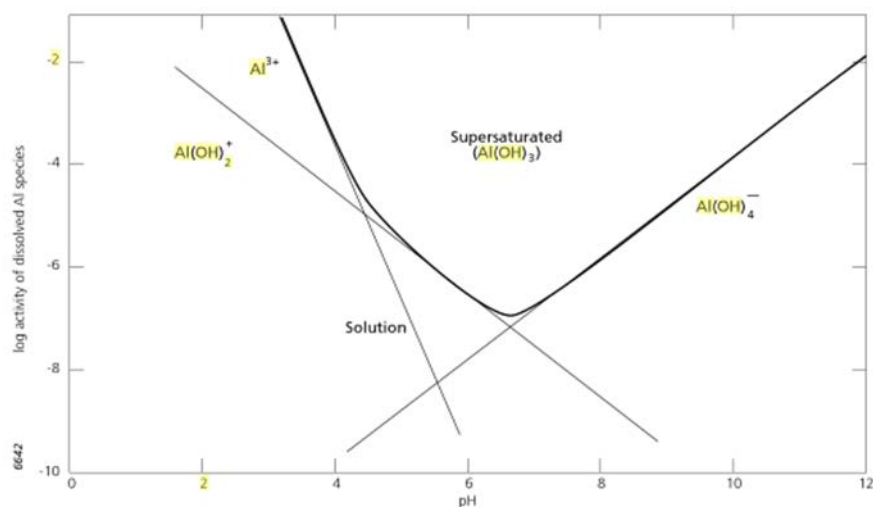


Figure 5.6 Percentage of total aluminium for the different aluminium species and total solubility of aluminium as function of pH (after Drever, 1982).

A.2 Modelling van de pH en colloïdale deeltjes, laagverfijning

(Geo)hydrologische modellen maken in de regel gebruik van cellen met een grid afmeting van circa 1 meter tot soms meer dan 100 meter per cel. Dit is gebruikelijk omdat calibratiepunten zoals stijghoogten metingen op honderden meters afstand liggen, en laagbeschrijvingen (boorkernen) op een schaal van dm/m wordt beschreven.

Voor (grond)waterkwaliteitsmodellen is deze meterschaal vaak voldoende, verspreiding van contaminanten wordt berekend aan de hand van bronnen (puntlozing, achtergrondconcentraties, lijnelementen), die vervolgens conservatief getransporteerd worden. Dat wil zeggen, de contaminant concentratie is een functie van de bron, retardatie (binding aan de vaste fase) en verdunning/menging. Voor de modellering is het van belang dat de tijd- en afstandsschaal om de waterkwaliteit te beschrijven.

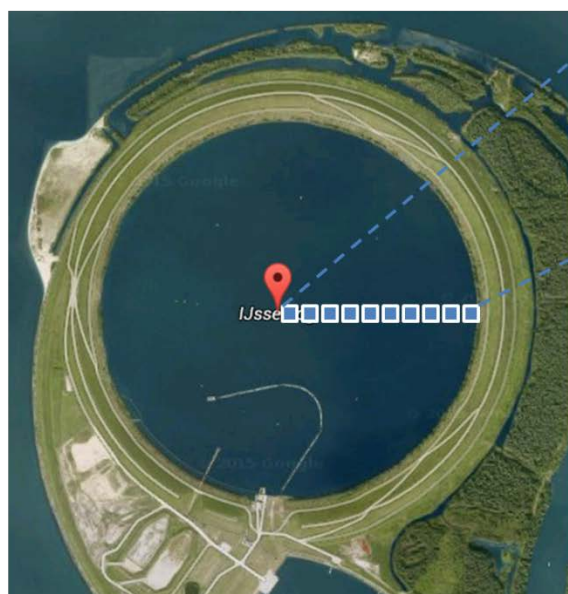
Voor reactieve geochemische modellen, waarin de grond(water)concentratie afhangt van processen die zich op een afstandsschaal van enkele mm af kunnen spelen, is de benodigde laagverfijning dan ook veel fijner (mm schaal).

Het koppelen van reactieve geochemische modellen aan geohydrologische transportmodellen is rekenkundig een uitdaging.

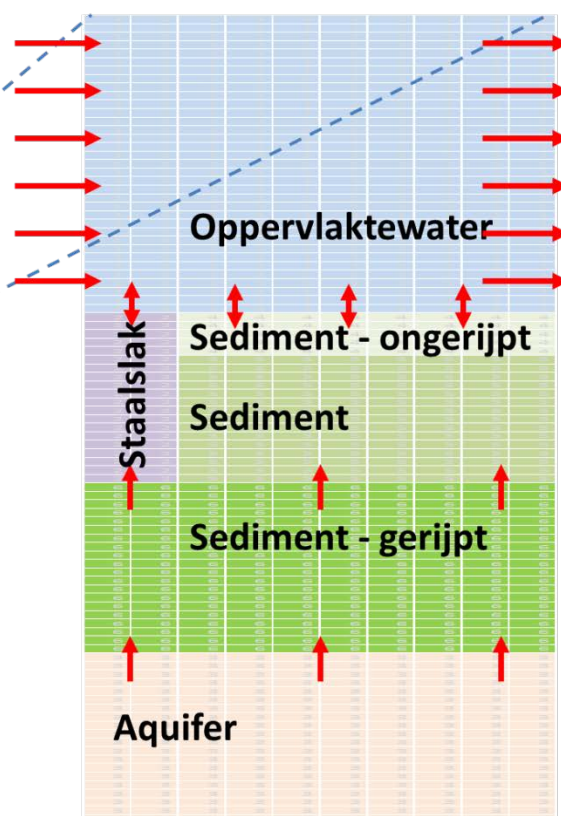
In deze studie is gekozen voor een verticale schaal van 5 mm op de grensvlakken en een horizontale schaal van 50 meter. Dit levert een model op van 95 lagen in de verticaal (met een totale laagdikte van 6 meter), en een 500 meter in de horizontaal (de straal van het depot). Deze 2DV schematisatie is een taartpuntdoorsnede van het depot, zie Figuur A.1.

De gekozen schematisatie levert een model met 950 actieve cellen op, met uitwisseling op de randen (oppervlaktewater en grondwater). De rekentijdstep nodig om met deze laagverfijning de geochemische reacties te beschrijven is < 1 minuut (43 seconden). Het doorrekenen van een periode van 1 jaar kost 5 dagen rekentijd (Deltares Xeon rekencluster, 2015).

Horizontale schematisatie



/ Vertikale schematisatie



Figuur A.1 2DV schematisatie depot

Om te valideren de schematisatie van 5 mm voldoende nauwkeurig is is gekeken of de vergroving van de laagverfijning tot 50 mm (5 cm) een ander beeld oplevert met betrekking tot de vorming van colloïdale deeltjes. Indien de schematisatie de kritische stap is, zou bij vergroving van het rekengrid de uitwisseling tussen de modellagen afnemen. Validatie dat de uitwisseling minimaal beïnvloedt wordt levert de zekerheid dat het model voldoende nauwkeurig is met betrekking tot advectief en diffusief transport.

Modeluitkomst, basis scenario:

- Gehele staalslaksteunberm onafgedekt (20% van het totaal depot oppervlak),
- Periode 1 jaar,
- Oppervlakte water komt eerst in contact met staalslak, daarna met sediment
- Consolidatie slib meegenomen in de vorm van kwel (dus extra flux naar het opp. water)
- Concentraties uitstromend water op 5 dieptes weergegeven: 0,5 m (ondiep), 1,0 m, 2,0 m, 2,5 m en 3,0 m (diepste deel waterkolom, nabij grens met sediment/staalslak).

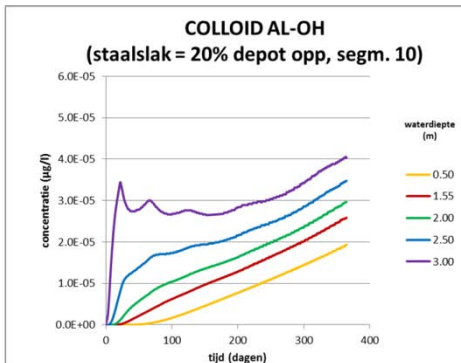
De resultaten worden weergegeven voor:

- Colloïdaal aluminium
- Colloïdaal barium
- Magnesium (als vaste fase)

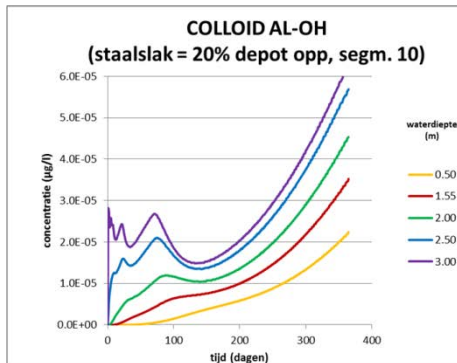
De vorming van colloïdaal aluminium wordt beïnvloedt door de laagverfijning van 5 cm tot 5 mm, de concentratie op een waterdiepte van 3 meter neemt met 50% toe. Voor colloïdaal barium is er nauwelijks verschil. De vorming van magnesium deeltjes laat ook geen verschil met laagverfijning zien. De laagverfijning van 5 mm is nodig (zie colloïdaal aluminium). Verdere modelverfijning is gezien de geringe concentratie colloïdaal aluminium (0.00006 µg/l) geen prioriteit.

Colloidaal aluminium

Laagverfijning 5 cm

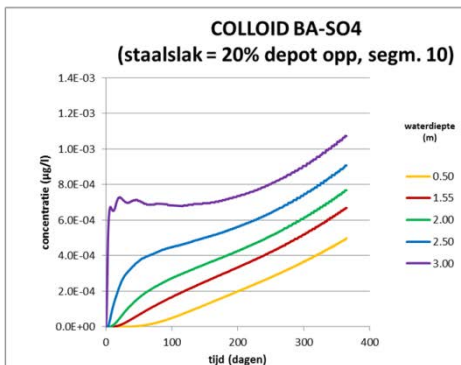


Laagverfijning 5 mm

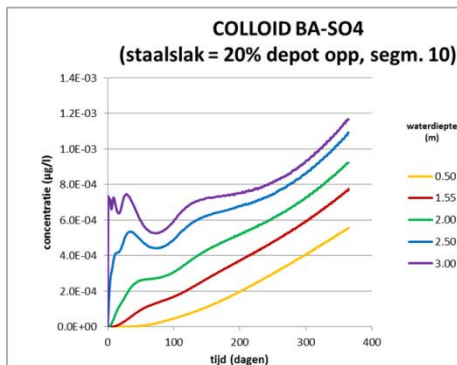


Colloidaal barium

Laagverfijning 5 cm

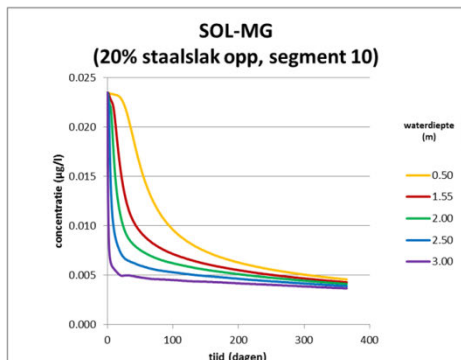


Laagverfijning 5 mm

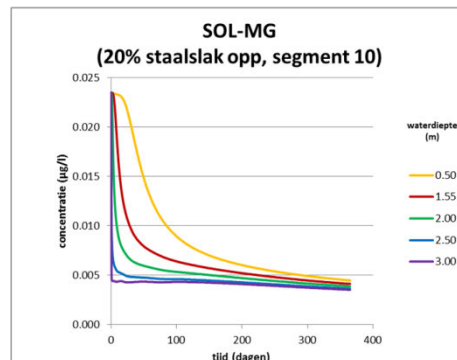


Magnesium - deeltjes

Laagverfijning 5 cm



Laagverfijning 5 mm



A.3 Samenstelling staalslak, sediment en water in het geochemisch model

De Initialisatie van het geochemisch model voor de staalslakken vond plaats op basis van:

- "Milieuchemische effecten bij het gebruik van staalslak in oeverbescherming: Laboratorium voorspelling en praktijkwaarnemingen", ECN-CX-95-013, 1995
- Euroslag, generieke samenstelling Basic Oxygen Steel (BOS) Slag
- U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 69, No. 2, 2007 ISSN 1454-2331
- Wikipedia voor steel slag minerals

De reden dat meerdere bronnen werden geraadpleegd komt omdat weliswaar de element samenstelling gerapporteerd is in het ECN rapport, maar niet alle bijbehorende mineralen. Op basis van de elementsamenstelling is op basis van de literatuur een passende minerale matrix opgesteld.

Deltares heeft tevens zelf een chemische en mineralogische analyse uitgevoerd op staalslak uit de dijk (2015). Van belang is dat het in 2015 gemeten calciumhydroxide gehalte in de staalslak veel lager is dan in de oorspronkelijke chemische samenstelling van de staalslak (grotendeels gebaseerd op het ECN rapport CX-95-013, 1995). De staalslak is daarmee veel minder reactief dan bij aanleg van de Averijhaven. Omdat de invloed van de staalslak op de waterkwaliteit het grootst is bij een hoog calciumhydroxide gehalte blijft het originele calciumhydroxide gehalte (ECN, 1995) de basis voor de modellering. De resultaten van deze analyse zijn gebruikt als modelscenario, en wordt vergeleken met de originele aannamen.

Voor het sediment is gebruik gemaakt van de sorptiecapaciteit op basis van het klei gehalte (de CEC), de aanwezigheid en afbraak van organisch materiaal, het kalk gehalte en het ijzergehalte (zowel ijzeroxide als ijzersulfide). De basissamenstelling komt overeen met IJsseloog slib (Deltares rapport 1208489, Monitoring inslibproef IJsseloog, 2015). Voor Averijhaven slib is de saliniteit van het sediment verhoogd (Deltares rapport 1207446, Bergen van zoute baggerspecie in IJsseloog, 2013).

Tabel A.1 Samenstelling staalslak, ECN 1995, aangevuld met ontbrekende elementen

element	min mg/kg	max mg/kg	gem mg/kg	molgew g/mol	gem mol/kg	$\rho = 3.6 \text{ g/cm}^3$ mol/m ³
Si	44100	60000	52050	28.09	1.853	6671.8
Al	2940	9970	6455	26.98	0.239	861.3
Fe	169600	281000	225300	55.85	4.034	14523.8
Ca	241600	345700	293650	40.08	7.327	26377.1
Mg	4407	15750	10078.5	24.31	0.415	1492.8
Na	2900	7000	4950	22.99	0.215	775.1
K	2600	4700	3650	39.10	0.093	336.1
SO ₄ (*)	2790	7222	5006	96.06	0.052	187.6
As	0.5	0.9	0.7	74.92	0.000	0.0
Ba	45	156	100.5	137.33	0.001	2.6
Cd	1	2	1.5	112.41	0.000	0.0
Cl	717	1460	1088.5	35.45	0.031	110.5
Cr	1633	2893	2263	52.00	0.044	156.7
Cu	2	24	13	63.55	0.000	0.7
F	95	356	225.5	19.00	0.012	42.7
Mn	19000	23480	21240	54.94	0.387	1391.8
Ni	0.5	3.2	1.85	58.69	0.000	0.1
Pb	40	64	52	207.20	0.000	0.9
Sb	0.1	0.2	0.15	121.76	0.000	0.0
Se	0.1	0.1	0.1	78.96	0.000	0.0
V	2045	3977	3011	50.94	0.059	212.8
Zn	1.2	18	9.6	65.39	0.000	0.5
massa verklaart (g/kg)			629			
massa onverklaart (g/kg): P (**)			15	30.97	0.484	1743.4
massa onverklaart (g/kg): C (***)			18	12.01	1.465	5275.4
massa onverklaart (g/kg): O (rest)			338	16.00	21.142	76109.7
(*) SO ₄ : alleen S gebruikt voor molaire omrekening						
(**) P: op basis van Euroslag samenstelling						
(***) C: op basis van aanname initieel 20% Ca als calcië						

Tabel A.2 Mineralen, passend bij de samenstelling van de staalslak

	ECN	formule	anaeroob	formule	Euroslag mineraal	formule	mineraal	formule	mineraal	formule	literature: U.P.B. Sci. Bull., mineraal formula	literature: wikipedia
Si	aeroob				dicalciumsilicaat	Ca ₂ SiO ₄					siliciumoxide SiO ₂	
Al					melilit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇					aluminiumoxide Al ₂ O ₃	
Fe					dicalciumferrite	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	wustite	FeO				
Ca	calciet	CaCO ₃	portlandiet	Ca(OH) ₂								
Mg	bruciet	Mg(OH) ₂	bruciet	Mg(OH) ₂							magnesiumoxide MgO	
Na	CEC	CEC-Na										
K	CEC	CEC-K										
S											zwavel S	
As												
Ba	bariet	BaSO ₄	lost op	--								
Cd												
Cl												
Cr											chromoxide Cr ₂ O ₃	calciumchloride CaCl ₂
Cu												
F			fluorite	CaF ₂								
Mn												
Ni											mangaanoxide MnO	
Pb												
Sb												
Se												
V												
Zn												
P												
C	calciet	CaCO ₃			Phosphorus pentoxid (P ₂ O ₅)							calciumfosfaat Ca ₃ (PO ₄) ₂
O												

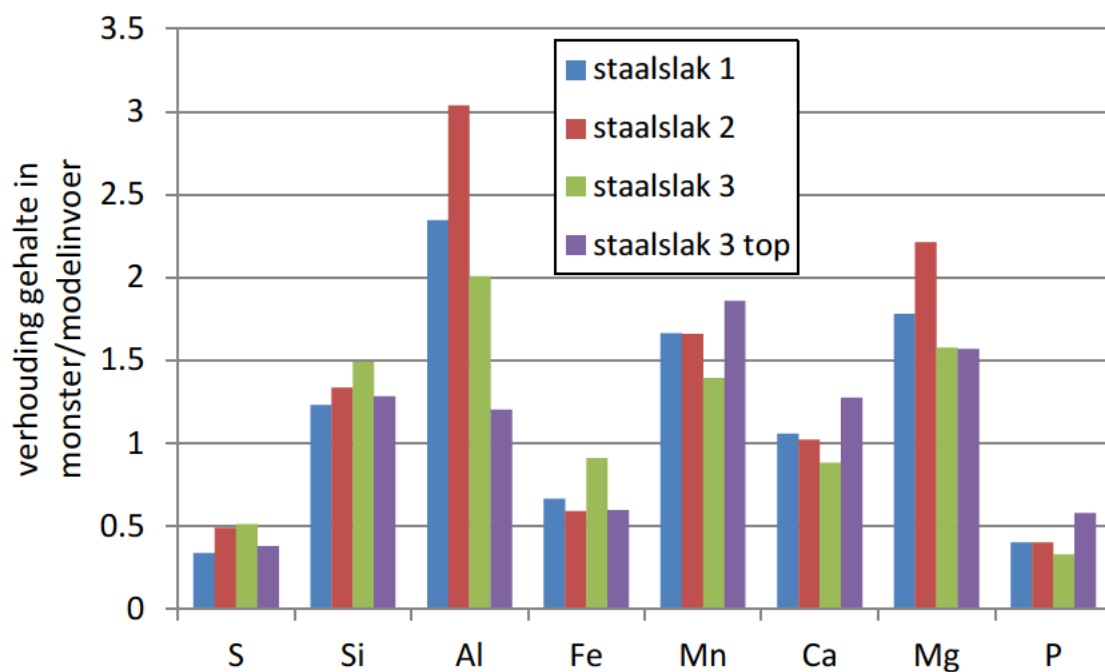
Tabel A.3 De match tussen element samenstelling, mineralen en concentraties

mineraal	CaSiO4	SiO2	Ca2Al2SiO7	Al2O3	Ca2Fe2O5	FeO	(Mg+Fe)	(Mg+Fe)	CaCO3	Ca(OH)2	Mg(OH)2	MgO	S	BaSO4	CaCl2	CaO3	CaF2	MnO	V2O5	P2O5	Ca3PO4	mass check	Δ mass / g		
% of el. mass	40%	55%	7%	5%	88%	12780,9	0,0	0,0	20%	50%	50%	50%	99%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0	mol/m3	int.mass mol/m3	% afwijking	
mol/m3	2.668,7	3.663,5	433,7	659,4	12780,9	0,0	0,0	0,0	5.275,4	13.188,5	746,4	746,4	188,0	2,6	0,0	78,3	21,4	1.391,8	106,4	871,7	0,0	6.772	6.672	1%	
Si	2669	3669	434				0																867	861	1%
Al			867			1319	0	0							0		21						14100	14524	-3%
Fe			867			1319			5275	13189	746	746											26009	26377	-1%
Ca	5337						0																1493	1493	0%
Mg																							0	--	0%
Na (+)																							0	--	0%
K (+)																							0	--	0%
S													185	3									188	188	0%
As																							0	0	0%
Ba														3									3	3	0%
Cd																							0	0	0%
Cl (+)															0								0	--	0%
Cr																157							157	157	0%
Cu																							0	1	0%
F																	43						43	43	0%
Mn								0										1392					1392	1392	0%
Ni																							0	0	0%
Pb																							0	1	0%
Sb																							0	0	0%
Se																							0	0	0%
V																			213				213	213	0%
Zn																							0	1	0%
P	10675								5275		1493	746						1392		532	4359	0	1743	1743	0%
C		7339							15826									1392					5275	5275	0%
O			3086	0	3297	12781	0							11		235							61721	76110	-19%

A.4 Gemeten samenstelling

Tabel A.4 XRF resultaten

	C	S	SiO2	Al2O3	TiO2	Fe2O3	MnO	CaO	MgO	Na2O	K2O	P2O5	Cr	Ni	Sr	Ba	Zr	
Averijhaven	1	16.1	1.68	38.3	7.2	0.38	9.4	0.13	7.2	1.6	1.85	1.51	0.38	97	37	217	331	133
	2	18.0	1.07	38.9	6.9	0.37	8.5	0.11	6.0	1.5	1.88	1.49	0.36	103	40	216	1,663	162
	3	13.7	0.83	44.7	6.8	0.35	8.7	0.13	7.2	1.5	1.49	1.45	0.41	93	31	220	358	161
	4	15.9	0.90	39.7	7.2	0.38	9.3	0.13	7.0	1.6	1.64	1.52	0.47	101	33	218	352	142
	5	19.1	1.24	35.6	8.2	0.41	8.5	0.13	5.9	1.7	1.89	1.69	0.36	101	45	249	2,652	109
	6	13.3	0.93	39.9	10.4	0.51	6.9	0.13	7.6	2.0	1.72	2.03	0.36	97	42	567	682	113
IJsselooog	1A	2.8	0.32	79.1	5.5	0.24	1.7	0.03	4.0	0.8	0.80	1.42	0.06	46	22	139	236	176
	1B	9.1	0.69	57.4	9.4	0.47	4.9	0.15	4.5	1.5	0.70	1.92	0.25	82	47	162	332	170
	2	12.4	0.98	42.8	10.9	0.50	8.5	0.13	5.4	1.6	0.59	1.80	1.48	208	72	186	922	143
	3 top	9.8	0.79	48.9	11.7	0.52	6.5	0.12	5.6	1.6	0.61	2.08	0.82	189	64	219	980	141
Staatslak	3 bottom	5.7	0.31	76.8	4.5	0.18	2.2	0.05	3.0	0.5	0.62	1.23	0.36	57	22	120	364	132
	4	10.4	1.02	47.2	11.2	0.55	7.1	0.13	6.0	1.6	0.64	1.91	1.10	234	71	201	1,005	166
	16 diep	12.9	1.23	45.2	11.0	0.52	7.1	0.12	5.4	1.6	0.59	1.84	1.19	224	77	203	1,042	149
	17 diep	10.3	0.82	51.2	9.1	0.51	5.6	0.13	7.2	1.5	0.69	1.78	0.92	232	59	210	934	217
	1	3.8	0.06	13.7	2.9	1.26	21.4	4.56	43.5	3.0	0.03	0.02	1.38	832	15	209	139	52
	2	4.8	0.08	14.9	3.7	1.14	19.1	4.55	41.9	3.7	0.08	0.03	1.38	835	17	214	200	144
	3	1.6	0.09	16.6	2.4	1.24	29.4	3.82	36.3	2.6	0.10	0.08	1.13	905	21	180	177	84
	3 top	0.5	0.06	14.3	1.5	1.37	19.3	5.10	52.4	2.6	0.03	0.00	1.99	999	6	271	106	51



Figuur A.2 Gemeten samenstelling versus oorspronkelijke modelaannname