



ALTERRA

WAGENINGEN UR

Intreeweerstand, nader beschouwd

Procesmatig onderzoek naar de relatie tussen de drainageweerstand en de intreeweerstand

H.Th.L. Massop
J.W.J. van der Gaast

Alterra-rapport 1350, ISSN 1566-7197



Intreeweerstand, nader beschouwd

Intreeweerstand, nader beschouwd

Procesmatig onderzoek naar de relatie tussen de drainageweerstand en de intreeweerstand

**H.Th. L. Massop
J.W.J. van der Gaast**

Alterra-rapport 1350

Alterra, Wageningen, 2006

REFERAAT

Massop H. Th.L. en J.W.J. van der Gaast, 2006. *Intreeweerstand, nader beschouwd; Procesmatig onderzoek naar de relatie tussen de drainageweerstand en de intreeweerstand*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1350. 3 blz.; 22 fig.; 14 tab.; 15 ref.

In dit onderzoek, dat is uitgevoerd binnen het BO Cluster Vitaal Landelijk Gebied, Thema Water van LNV, wordt aandacht besteed aan de procesmatige kant en de grootte van de intreeweerstanden. Kort wordt stilgestaan bij de theorie, processen, definitie, samenstelling en herkomst van het slootbodemmateriaal. Bij het eigenlijke onderzoek zijn gegevens over dikte en samenstelling van de sliblaag geïnventariseerd bij waterschap Rijn en IJssel. Vervolgens is in het veld gekeken naar het voorkomen van sliblagen en zijn monsters genomen en metingen verricht. In het laboratorium zijn deze monsters geanalyseerd op samenstelling en is de doorlaatfactor gemeten. In een laboratoriumopstelling is een stuk slootbodem geïmiteerd, aan de hand van materiaal uit het veld. Aan deze opstelling zijn metingen verricht. Verder is het effect van de intreeweerstand in analytische berekeningen vergeleken met modelberekeningen (MODFLOW). De beschikbare informatie is vervolgens gebruikt om landsdekkende kaarten te maken voor de intreeweerstand van het ontwateringssysteem en van het afwateringssysteem. Aangezien lutum/leemdeeltjes een bijdrage leveren aan de vorming van een intreeweerstand is een kaart gemaakt die de kans weergeeft dat lutum/leem deeltjes over het maaiveld naar de sloot kunnen worden getransporteerd.

Trefwoorden: Bodemweerstand, radiale stroming, slootbodem, talud

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 30,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 1350. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2006 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Probleemstelling	13
3 Theorie en proces	15
3.1 Definitie	15
3.2 Samenstelling en herkomst materiaal	16
3.3 Chemische gelaagdheid in de sliblaag	17
4 Onderzoek	19
4.1 Inventarisatie	19
4.2 Veldonderzoek	21
4.2.1 Grondwaterstandsmetingen	21
4.2.2 Visueel onderzoek	24
4.3 Laboratoriumonderzoek	28
4.3.1 Metingen	28
4.3.2 Laboratoriumopstelling	31
4.4 Modelberekeningen	34
4.4.1 Analytische formule	34
4.4.2 Modflowberekeningen	36
5 Intreeweerstand, landsdekkend ingevuld	41
5.1 Potentie voor de vorming van een intreeweerstand via materiaalaanvoer door stroming over het maaiveld	41
5.2 Landelijk beeld van de intreeweerstand	44
Conclusies	51
Literatuur	53
 <i>Bijlagen</i>	
1 Analyses bodemonsters omgeving “De Wildenborch”	55
2 Locaties en monsterbeschrijvingen uit het BIS	57
3 Literatuuronderzoek intreeweerstanden	69

Woord vooraf

In het kader van het BO Cluster Vitaal Landelijk Gebied, Thema Water van LNV is het project “Ontwatering in beeld” geformuleerd. Een onderdeel van dit project is het onderzoek naar intreeweestanden. In een eerder onderzoek is een inventarisatie uitgevoerd van veldonderzoeken naar intreeweestanden. In dit onderzoek zijn een aantal aspecten en ervaringen met betrekking tot het begrip intreeweestand nader uitgewerkt.

Door waterschap Rijn en IJssel zijn gegevens beschikbaar gesteld met betrekking tot de samenstelling van baggerlagen uit twee projecten, nl. het project Bagger en het project Monitoring. De gegevens uit deze projecten geven een ruimtelijk beeld van de samenstelling van de baggerlaag binnen het beheergebied van het waterschap.

De dank van de onderzoekers gaat uit naar Dhr. H. Prak van DLG en Dhr. J. Huinink van het IKC voor de begeleiding bij het onderzoek.

Samenvatting

In 1996 is een literatuurinventarisatie uitgevoerd naar onderzoeksgegevens over intreeweerstand. In dit onderzoek, dat is uitgevoerd binnen Cluster Vitaal Landelijk Gebied, Thema Water van LNV, is aandacht besteed aan de procesmatige kant van intreeweerstand.

Op verschillende manieren is gekeken naar het voorkomen en de eigenschappen van een bezinklaag of verstopping van de bodem en van het talud van de waterloop. Uit gegevens, beschikbaar gesteld door waterschap Rijn en IJssel is een ruimtelijk beeld verkregen van de samenstelling van de baggerlagen. Deze informatie, aangevuld met informatie verzameld via veldonderzoek, heeft aangetoond dat er vaak sprake is van afzetting van materiaal op de bodem van waterlopen, dit materiaal is niet of nauwelijks op het talud terug te vinden. Metingen in de vorm van raaien geven aan dat de weerstand vooral rondom waterlopen is geconcentreerd.

Via laboratoriummetingen is de weerstand van het materiaal bepaald en beproefd. Aan de hand van enkele modeloefeningen is gekeken naar het effect van de k-waarde van het materiaal op de intreeweerstand en naar het effect van verschillen in k-waarde tussen de bodem van de waterloop en het talud.

De veldervaring geeft aan dat de intreeweerstand niet uniform over de natte omtrek van de waterloop is verdeeld zoals veelal wordt aangenomen. Verder geven modeloefeningen aan dat bij een grote waarde voor de intreeweerstand rondom het natte oppervlak van de waterloop een kwelzone ontstaat, hierdoor is er geen lineaire relatie tussen de doorlatendheid en de intreeweerstand.

De resultaten van dit onderzoek zijn samen met resultaten van de studie “Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken” gebruikt om de intreeweerstand te vertalen naar landelijke kaartbeelden voor het ontwateringssysteem en het afwateringssysteem. Naast twee kaarten voor de intreeweerstand is een kaart gemaakt waarin wordt weergegeven voor welke gebieden de kans op de vorming van een intreeweerstand via aanvoer van lutum/leem door stroming over het maaiveld het grootst is.

1 Inleiding

Op voorspraak van de TNO Adviesraad is in september 1995 een Landelijke Hydrologische analyse van het Top Systeem (LHTS) voorgesteld. In de inceptiefase van het project heeft een verkennend, inventariserend en definiërend onderzoek plaatsgevonden (Negenman *et al*, 1998). In deze fase zijn wensen en behoeften geïdentificeerd en zijn kosten begroot. De stap van de inceptiefase naar een landsdekkend project leek bij voorbaat te hoog. Voorgesteld werd om aan de hand van twee pilot gebieden uitvoering te geven aan de doelstellingen van LHTS. De voorgestelde pilots zijn echter nooit uitgevoerd. De behoefte aan een LHTS-achtig project bleef echter bestaan, en daarom is binnen DWK een project Ontwatering in Beeld opgevoerd. De doelstelling van dit project is de beschrijving van de relatie grondwater-oppervlaktewater aan de hand van de opzet en beheer van databestanden. Vier thema's zijn hierbij van belang:

- geohydrologische schematisatie en parametrisatie van het topsysteem,
- parametrisatie van ont/afwateringsmiddelen,
- aanwezigheid van buisdrainage en
- intreeweestanden.

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van het onderzoek naar intreeweestanden.

In 1996 zijn door Jousma en Massop onderzoeken naar intreeweestanden geïnventariseerd. Deze inventarisatie geeft een overzicht van het uitgevoerde onderzoek naar intreeweestanden. Sinds dit literatuuroverzicht is er, voor zover is na te gaan, weinig aanvullend onderzoek uitgevoerd, zodat deze inventarisatie nog steeds wordt gebruikt als overzicht met betrekking tot de veldkennis over intreeweestanden. In bijlage 3 is een samenvatting opgenomen van de resultaten van deze literatuurstudie.

In dit onderzoek wordt nader ingegaan op het fenomeen intreeweestanden mbt de aard, samenstelling en eigenschappen van het materiaal dat de intreeweestand veroorzaakt. De resultaten van de literatuurstudie zijn vervolgens gebruikt om landsdekkende kaarten voor de intreeweestand samen te stellen.

2 Probleemstelling

Grondwater ondervindt bij stroming naar het oppervlaktewater een weerstand, veelal aangeduid als de drainageweerstand. De drainageweerstand kan volgens de theorie van Ernst opgesplitst worden in een aantal deelweerstand, waarvan de intreeweerstand er één is. Over de intreewestanden is relatief weinig bekend (Jousma en Massop, 1996). Kennis over de intreewestanden is van belang omdat deze weerstand mede het verloop van de grondwaterstand tussen waterlopen bepaalt. Bij hydrologisch modelonderzoek wordt de intreeweerstand veelal gebruikt om het model te calibreren, hiervoor is inzicht in de grootte en variatie van deze parameter noodzakelijk.

In de directe omgeving van de waterloop spelen twee weerstanden een rol nl. de radiale en de intreeweerstand, nagegaan moet worden of deze weerstanden in het veld te onderkennen zijn.

Uit het voorgaande blijkt dat er behoefte is aan informatie over de grootte en het effect van de intreeweerstand op de grondwaterstand. Via verschillende methoden zal worden gepoogd de intreeweerstand te beschrijven. De doelstelling van het onderzoek is het benaderen van de intreeweerstand via verschillende methoden om inzicht te verschaffen in de grootte van de intreeweerstand en daaruit aanbevelingen af te leiden mbt verder onderzoek.

3 Theorie en proces

In dit hoofdstuk wordt allereerst ingegaan op de definitie van de intreeweerstand, vervolgens op de samenstelling en de herkomst van het materiaal en wordt kort iets gezegd over de chemische gelaagdheid.

3.1 Definitie

Hoewel Ernst (1962) in zijn proefschrift nauwelijks aandacht besteedt aan het onderwerp intree/uittreeweerstand is de volgende voetnoot ontleend aan Ernst:

‘Het is naar mijn mening beter de termen “intreedweerstand” en “uittreedweerstand” te gebruiken voor de weerstand van de aangroeiende bezinklaag op de bodem van open leidingen, respectievelijk bij leidingen, waaruit water wegzijgt en bij drainerende leidingen, en de totale weerstand in de omgeving van de open leiding aan te duiden door de radiale weerstand.’

Bij deze definitie van Ernst wordt in deze studie aangesloten, en in navolging van Jousma en Massop (1996) wordt de intree-/uittreeweerstand gedefinieerd als:

‘Weerstand ondervonden door grondwater bij intreden/uittreden, van een open of gesloten leiding tengevolge van een weerstandbiedende (grens)laag.’

Intreewestanden worden dus in zandgebieden voornamelijk veroorzaakt door afzetting van materiaal op de oorspronkelijk bodem van de waterloop of door indringing van materiaal in de ondergrond (verstopping). In kleigebieden heeft de weerstand vooral betrekking op een grenslaag bestaande uit hetzelfde materiaal.

In de drainageformule van Ernst wordt de intreeweerstand als afzonderlijke term in de volgende vorm toegevoegd.

$$c_i = \frac{LC_b}{B_{wp}}$$

$$c_b = \frac{d}{k_v}$$

Hierin is: c_i = intreeweerstand (dagen)
 L = slootafstand (m)
 c_b = slootbodeweerstand (dagen)
 B_{wp} = natte omtrek (m)
 d = dikte bezinklaag (m)
 k_v = doorlaatfactor bezinklaag (m/d)

Bij de beschrijving van deze weerstand dient onderscheid te worden gemaakt tussen de weerstand van de bezinklaag, die we zullen aanduiden met slootbodembreestand (c_b) en de gebiedsgemiddelde (diffuse) waarde van deze weerstand, die we zullen aanduiden als intreebreestand. Beide weerstanden hebben de dimensie dag maar verschillen in grootte als gevolg van het verschil in grootte van de drainageflux.

De stromingsrichting van het grondwater bepaalt of we spreken van intree- resp. uittreebreestand, deze weerstanden komen overeen met een drainage- resp. infiltratiesituatie (wateraanvoer).

Bij deze beschouwing wordt uitgegaan van een bezinklaag, die zich op de bodem van de waterloop afzet. Naast de bodem staat ook een deel van het talud in contact met het oppervlaktewater. Daar de waterlaag boven de bodem langer in tact blijft en dikker is dan de laag boven het talud, is de verwachting dat de bezinklaag boven het talud geringer is dan boven de bodem. Hierdoor kan een verschil in weerstand tussen de slootbodembreestand en talud van de sloot ontstaan, waardoor het mogelijk is dat de intreebreestand sterk afhankelijk is van het waterpeil in de sloot. Hiermee is de intreebreestand dus niet gelijkmatig verdeeld over de natte omtrek, en daarmee is de vervangingsbreestand afhankelijk van de waterdiepte.

3.2 Samenstelling en herkomst materiaal

De volgende bronnen kunnen een bijdrage leveren aan de vorming van een afzettinglaag op de waterbodembreestand:

- *Erosieprodukten*, als gevolg van erosie van het oppervlak en de omtrek van waterlopen ontstaan erosieprodukten die door het water worden meegevoerd. Dit proces is duidelijk zichtbaar als de ontwateringsmiddelen pas zijn aangelegd en de begroeiing grotendeels ontbreekt. Onder invloed van stroming van water worden bodemdeeltjes getransporteerd (via suspensie, saltatie en rollen) en afgezet (resuspensie). Bij pas aangelegde drains vindt uitspoeling van fijne deeltjes plaats via de openingen tussen de drains waardoor in de directe omtrek poriën en fijne kanaaltjes ontstaan (Stuyt, 1992). Tegenwoordig wordt veel aan erosiebestrijding gedaan en neemt mogelijk de hoeveelheid slib af als gevolg van de toenemende aanleg van zandvangen. Verder vindt bij hoge neerslagintensiteiten mogelijk afvoer over het maaiveld plaats, waarbij o.a bodemdeeltjes kunnen worden meegevoerd (figuur 1). De dichtheid van dit materiaal is ca 2,6 g/cm³.
- *Lozingen*. Onder lozingen op het oppervlaktewater vallen de lozingen door particulieren en industrie, riooloverstorten en rioolzuiveringsinstallaties (RWZI's). In het verleden was de hoeveelheid slib afkomstig van menselijke lozingen aanzienlijk. Doordat de meeste bebouwing inmiddels is aangesloten op de riolering, en door het toenemend aantal RWZI's, met betere zuiveringstechnieken is de hoeveelheid slib sterk gereduceerd. Hierdoor mag worden verwacht dat de vorming van intreebrestanden na het opschonen van waterlopen minder snel en minder sterk zal toenemen als gevolg van deze maatregelen.
- *Organisch materiaal*. Het organisch materiaal bestaat uit levend organisch materiaal (zoöplankton en fytoplankton) en dood organisch materiaal (detritus). Dode

planteresten kunnen na afsterving naar de bodem zakken, boombladeren kunnen in de sloot waaien en daar een laagje organisch materiaal vormen, dat bijdraagt aan de vorming van de intreeweerstand. De dichtheid van organisch materiaal is ca 1,0 g/cm³.

- *Minerale neerslagen.* Bij kwel van grondwater naar sloten kan neerslag van mineralen optreden als gevolg van oververzadiging van het water met carbonaten en fosfaten of door oxidatie van opgelost gereduceerd ijzer.



Figuur 1 Stroming over maaiveld (foto P.J.T. van Bakel, dd 9 maart 2006)

3.3 Chemische gelaagdheid in de sliblaag

Oppervlaktelagen van sedimenten kunnen worden beschouwd als biofilms met een actieve microbiële laag, die biologisch afbreekbaar materiaal door middel van hydrolyse en aërobe en anaërobe omzetting omzet in methaan, azijnzuur, kooldioxide etc. Azijnzuur en methaan kunnen verder worden geoxideerd. Bij deze processen komt ammonium en nitraat vrij en vinden nitrificatie en denitrificatie plaats. Op basis van deze processen kunnen meerdere sedimentlagen worden onderscheiden:

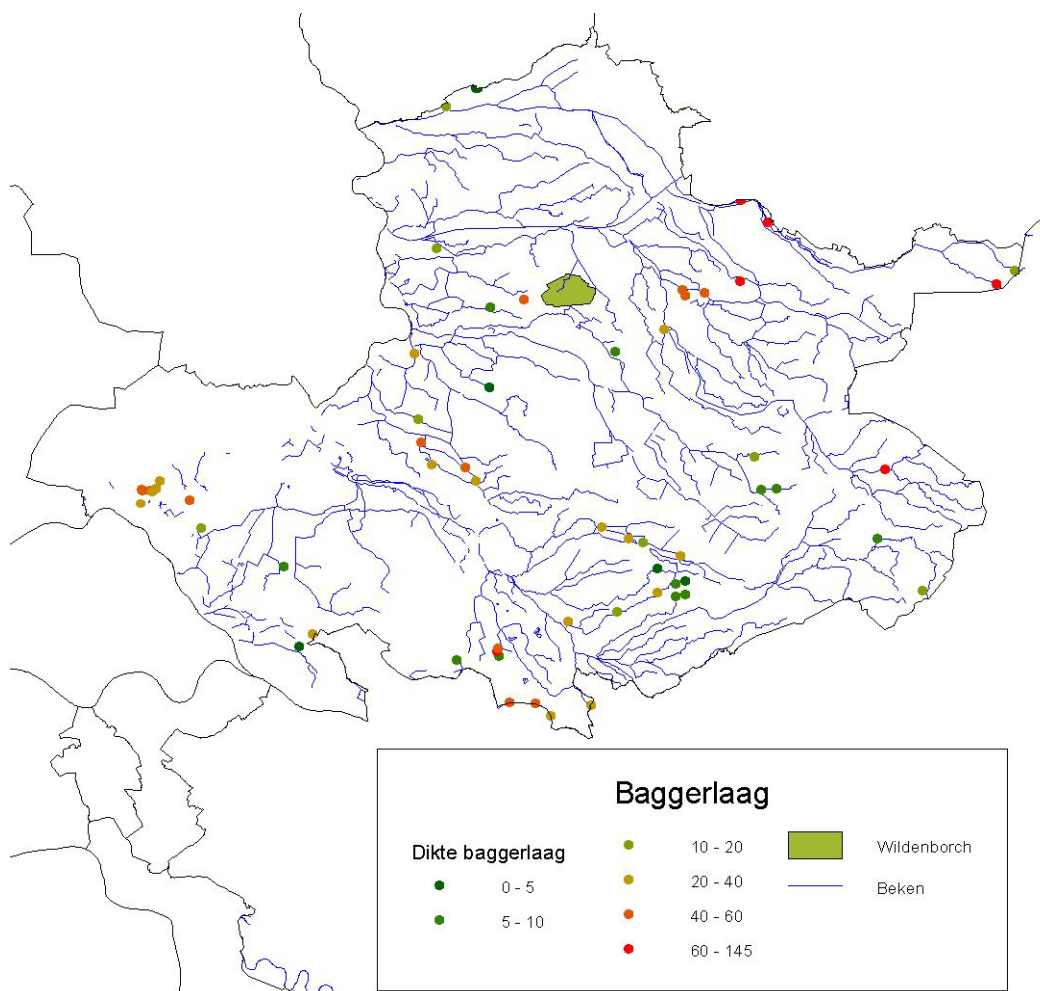
- aërobe laag (zuurstof elektronen acceptor);
- anoxische laag (nitraat elektronen acceptor);
- anaërobe laag (koolstofdioxide elektronen acceptor).

4 Onderzoek

4.1 Inventarisatie

Om een eerste indruk te krijgen mbt tot de aanwezigheid van een weerstandbiedende laag op de slootbodembodem is contact gezocht met een waterschap, nl. waterschap Rijn en IJssel te Doetinchem. Dit waterschap heeft in het kader van twee projecten nl. Project Bagger en Project Monitoring gegevens verzameld over de aanwezigheid en de samenstelling van baggerlagen in waterlopen binnen het beheergebied van het waterschap.

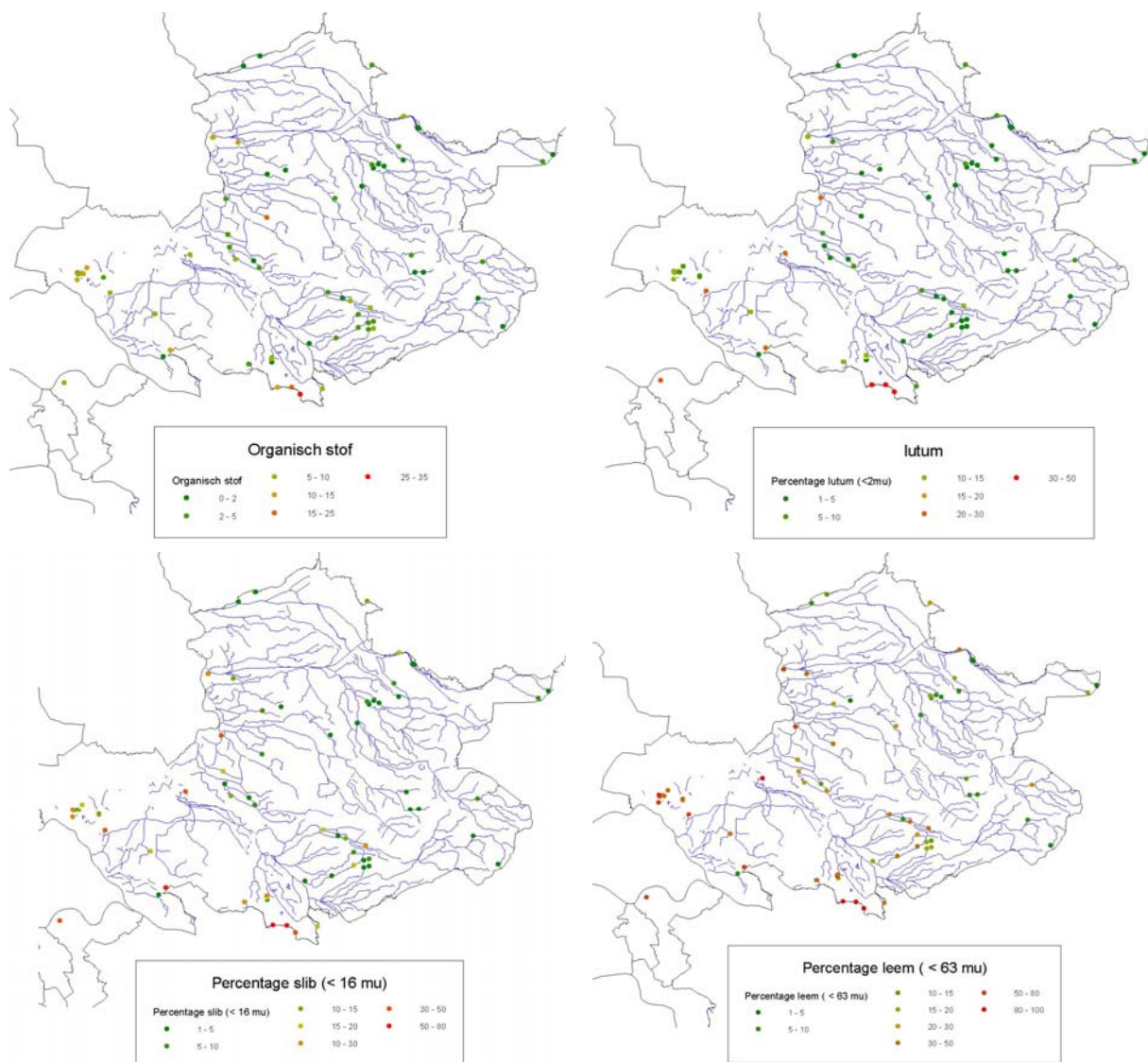
In figuur 2 is de locatie en de dikte van de baggerlaag weergegeven.



Figuur 2 Dikte baggerlaag in cm op verschillende locaties binnen het beheergebied van waterschap Rijn en IJssel

Uit figuur 2 blijkt dat een baggerlaag op verschillende plaatsen binnen het beheergebied voorkomt en aanzienlijk in dikte kan verschillen, er lijkt tevens geen ruimtelijk patroon te zijn van de laagdikte.

Naast de dikte van de baggerlaag zijn ook op een aantal locaties analyses beschikbaar. In figuur 3 zijn voor een aantal locaties het organisch stof gehalte, lutum gehalte (<2 μ m), slibgehalte (<16 μ m) en leemgehalte (<63 μ m) weergegeven.



Figuur 3 Organisch stofgehalte, lutum, slib en leemfractie (< 63 μ m) van een aantal slootbodemmonsters in beheergebied Waterschap Rijn en IJssel

Uit figuur 3 blijkt dat het organisch stofgehalte van de monsters overwegend kleiner is dan 5 %, ook het percentage lutum is in het zandgebied overwegend < 5 %. Bij het slibgehalte treedt duidelijk wat meer differentiatie op tussen de monsters. Verder blijkt dat voor de fractie < 63 μ m vrij hoge percentages voor kunnen komen. De doorlatendheid van het materiaal wordt bepaald door de grofheid van het zand

(M50-cijfer), slibgehalte en sortering. Een hoog percentage fijne delen duidt op een lagere doorlatendheid. De gegevens van waterschap Rijn en IJssel geven aan dat er op veel locaties sprake is van de aanwezigheid van een baggerlaag.

4.2 Veldonderzoek

Om het effect van de intreeweerstand nader te onderzoeken is een beperkt veldonderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek heeft plaatsgevonden op een aantal locaties in Oost-Gelderland, o.a. in de omgeving van de Wildenborch (figuur 2), te Lochem en nabij Heelweg. Het procesonderzoek en het nader onderzoek van de sliblaag is uitgevoerd in de omgeving van de Wildenborch. Bij dit onderzoek zijn de volgende aspecten bekeken:

- is een intreeweerstand aan te tonen op basis van grondwaterstandsmetingen;
- is visueel in het veld een afzetting op de slootbodem aantoonbaar;
- wat is de samenstelling van het materiaal.

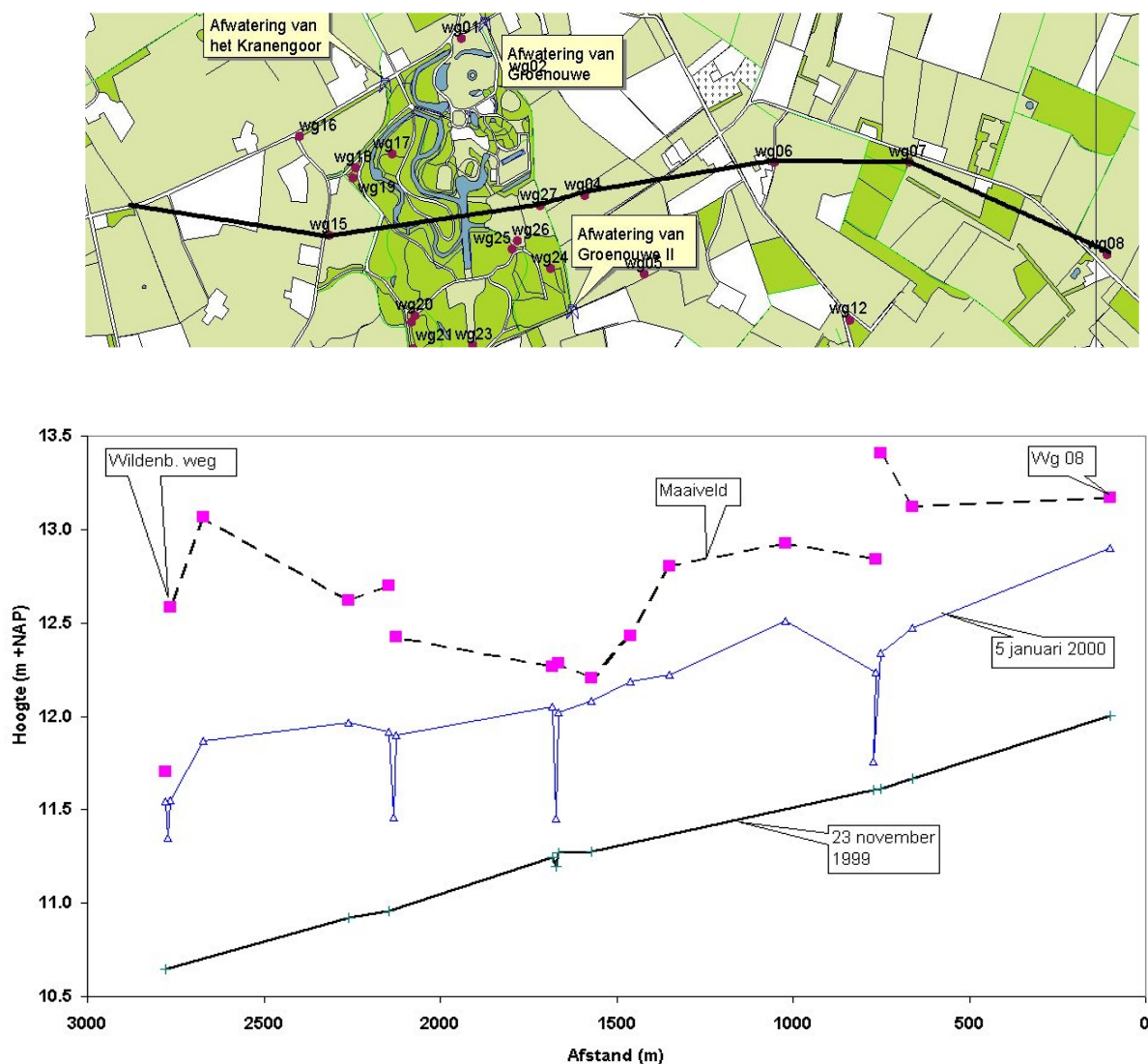
4.2.1 Grondwaterstandsmetingen

Om het effect van een eventuele intreeweerstand op de grondwaterstand vast te stellen zijn drie raaien nader bekeken. De eerste raai ligt over de Wildenborch, de tweede raai ligt in Lochem tussen Berkel en het Twenthekanaal en de derde nabij Heelweg (Varsseveld).

4.2.1.1 Raai 1 (Wildenborch)

In het najaar van 1999, toen alle waterlopen in de omgeving van het landgoed “De Wildenborch” droog waren gevallen, is een raai grondwaterstandsbuizen geplaatst. De eerste peilingen zijn uitgevoerd op 23 november 1999. In figuur 4 is te zien dat de metingen in deze droge periode de regionale helling van de grondwaterstroming weergeven. Na 23 november werd de situatie natter, en stijgt de grondwaterstand. De afvoer in de watergangen kwam daarmee op gang. In het gebied van “De Wildenborch” beginnen eerst de hogere delen af te voeren, de meer benedenstroomse gebieden volgen enige tijd later. Hierdoor staat aanvankelijk in de benedenstroomse delen van de watergangen al water terwijl de grondwaterstand nog beneden de slootbodem ligt. Voor 5 januari 2000, op een relatief nat moment, is eveneens de grondwaterstand weergegeven, deze ligt op dat moment een stuk hoger, duidelijk zijn de insnijdingen van de verschillende waterlopen zichtbaar. Geconstateerd werd dat de grondwaterstand naast de sloot zeer sterk oploopt, op ca 2 m van de sloot bevindt de grondwaterstand zich al dicht onder maaiveld. Een reactie van een inwoner uit het gebied was, dat hij in het land wel eens wellen heeft waargenomen, in die situatie stijgt de grondwaterdruk zelfs tot boven het maaiveld.

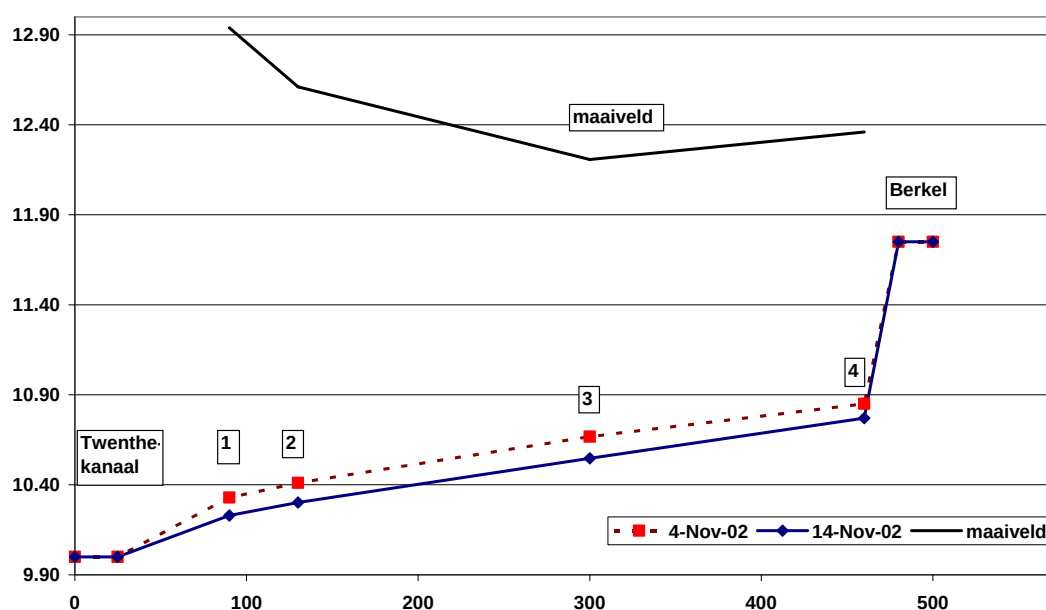
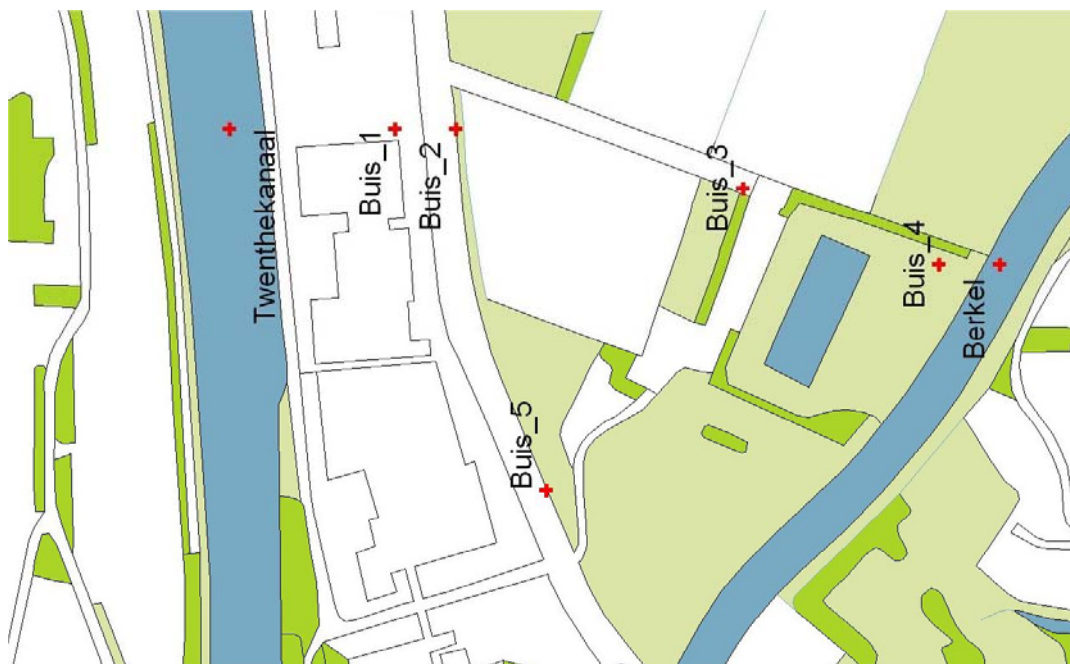
Uit figuur 4 blijkt dat de drainageweerstand geconcentreerd is nabij de waterloop, dit betekent tevens dat de radiale en/of intreeweerstand bepalend zijn voor de grootte van de drainageweerstand. Om beide weerstanden te scheiden is meer detailonderzoek nabij de sloot noodzakelijk.



Figuur 4 Raai met grondwaterstandsbuizen over het landgoed de Wildenborch

4.2.1.2 Raai 2 (Lochem)

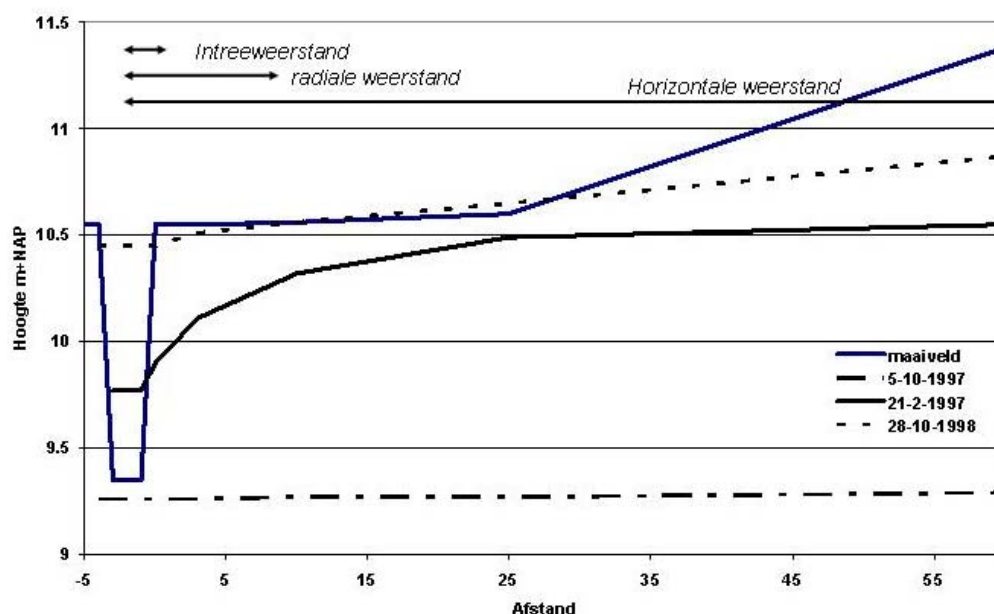
Een tweede raai ligt in de directe omgeving van Lochem tussen het Twenthekanaal en de Berkel. Beide waterlopen zijn relatief breed. Er is ter plaatse van de raai een groot peilverschil (Twenthekanaal peil, 10,00 m+ NAP, Berkel peil 11,70 m+ NAP). Voor twee data is het verloop van de grondwaterstand weergegeven. Uit figuur 5 blijkt dat er bij het Twenthekanaal nauwelijks sprake is van radiale en intree weerstand. Vanwege de grote breedte van het kanaal (natte omtrek kanaal komt ongeveer overeen met de dikte van het watervoerend pakket) zal de radiale weerstand gering zijn. Onderzoek van de kanaalbodem (Wit *et al*, 1987) heeft aangetoond dat de intree weerstand van het kanaal gering is. Bij de Berkel blijkt wel een grote weerstand aanwezig te zijn. Er infiltreert water vanuit de Berkel naar de omgeving.



Figuur 5 Raai met grondwaterstandsbuizen tussen het Twenthekanaal en de Berkel te Lochem

De radiale weerstand moet gering zijn, vanwege de relatief grote breedte van de Berkel, dit betekent dat bij de Berkel sprake is van een hoge uittreweerstand. De Berkel heeft een groot achterland, wat de aanvoer van slib mogelijk maakt. In het verleden werd de Berkel gebruikt voor bevoeding. Het hooi van Berkelweiden werd geroemd om de kwaliteit. De hoge kwaliteit was te danken aan de voedselrijkdom van het slib (Coesfeldse kleigronden). Daarnaast kan de hoge weerstand een gevolg zijn van mogelijk verstopping van de oorspronkelijke ondergrond door infiltratie.

4.2.1.3 Raai 3 (Heelweg)

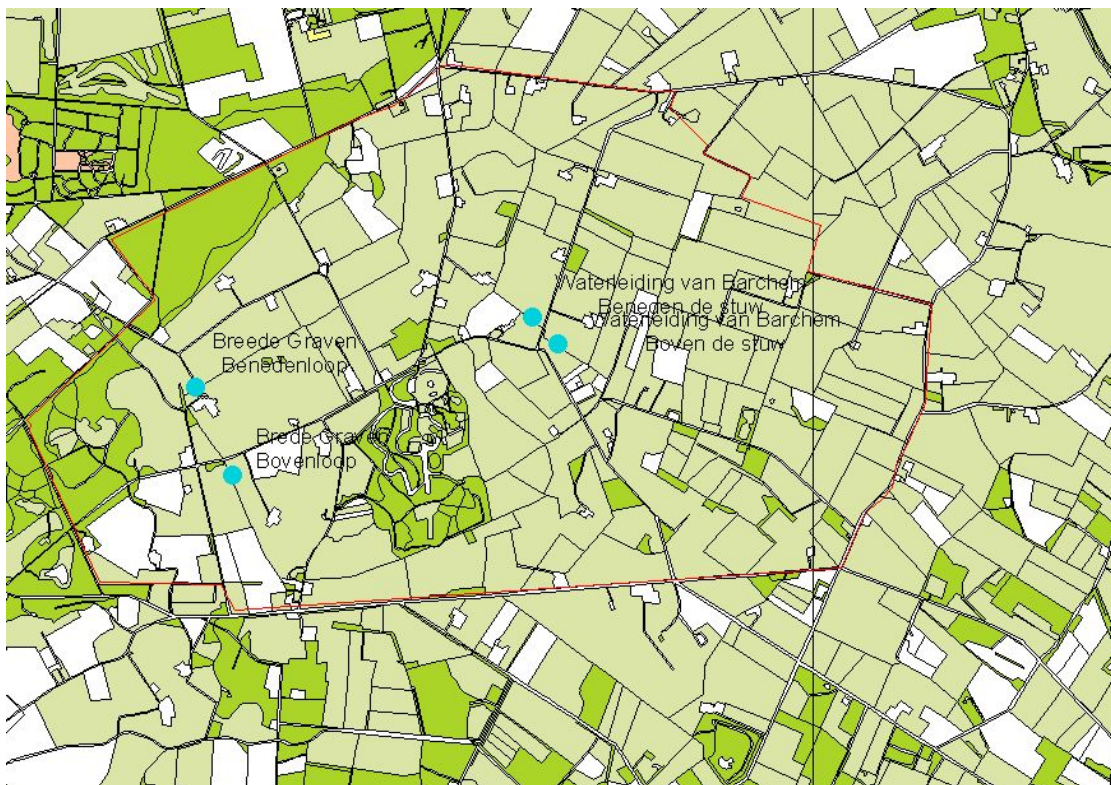


Figuur 6 Raai met grondwaterstandsbuizen nabij een waterloop in Heelweg

In figuur 6 is het grondwaterstandsverloop voor 3 meetdata in een raai weergegeven. In de onderste lijn is een situatie met een droge waterloop weergegeven en de bovenste lijn geeft een situatie waarbij de afvoer door opstuwing wordt geremd, en plassen aan maaiveld ontstaan. De tussenliggende lijn geeft een afvoersituatie weer, de grondwaterstand naast de sloot loopt minder snel op dan bij de Wildenborch en duidt op een effect van de radiale weerstand.

4.2.2 Visueel onderzoek

Voor een visuele inspectie is een veldbezoek gebracht aan de omgeving van De Wildenborch. Het betreft een droge dag in een droge periode. Alle sloten, met uitzondering van het bovenstroomse deel van de Waterleiding van Barchem (geen afvoer), staan droog. Met een gutsboor is de bodem van de sloten op verschillende locaties bestudeerd. Overall wordt een bepaalde laag aangetroffen, die verder wordt aangeduid als baggerlaag. Deze baggerlaag heeft een bruine kleur aan maaiveld (als gevolg van invloed van lucht) en wordt op ca 5 cm diepte zwart van kleur. Bij sloten die kort daarvoor met de korf zijn schoongemaakt, zijn door de tanden van de korf 'messtrepen' in de bagger gesneden. De baggerlaag is bij het schoonmaken niet verwijderd, aangezien op het maaipad geen bagger is aangetroffen. Er is een scherpe overgang naar de zandondergrond gevonden. Deze overgang is bij gebruik van de guts herkenbaar aan de verandering in de indringingsweerstand, deze weerstand is in de baggerlaag klein en de weerstand neemt op een bepaalde diepte plotseling sterk toe. Soms komen venige laagjes of inspoelingslaagjes voor in de zandondergrond. Op 13 oktober, een droge dag waarbij het 's nachts licht had gevoren, is de dikte van de sliblaag nader onderzocht en zijn enige foto's gemaakt.



Figuur 7 Locaties van onderzoek naar de waterbodem in de omgeving van De Wildenborch

Op 4 plaatsen (zie figuur 7), nl 2 in de Waterleiding van Barchem en twee in de Breede Graven, zijn sleuven in de bodem gegraven. De sleuven (profielkuil) zijn dwars op de waterloop gegraven om een zijaanzicht van de bodem en het talud te verkrijgen.

In de waterloop van Barchem werd 30-40 cm slap materiaal aangetroffen (figuur 8). Aan de zijkant van de slootbodem kwamen op ca 20 cm-slootbodem de ronde paalkoppen van de beschoeiing te voorschijn. Tussen de palen waren ronde takken gevlochten. Dit geeft aan dat de baggerlaag is afgezet op de oorspronkelijke bodem, en de bodem dus aanzienlijk is verhoogd. Bij het uitgraven kwam op ca 40 cm – slootbodem schoon blond zand te voorschijn. Dit zand onderscheidt zich van de bovenliggende laag door de grote stevigheid/draagkracht en grotere indringingsweerstand. Dit is naar alle waarschijnlijk de oorspronkelijke bodem van de waterloop, het materiaal erboven is daarop later afgezet.



Figuur 8 Bovenaanzicht van de gegraven sleuf en slootbodem in de Waterleiding van Barchem

De sleuf is doorgezet in het talud. Het blijkt dat de baggerlaag zich op de bodem heeft afgezet en niet of nauwelijks op het talud. Het talud is met gras begroeid, de bovenste laag is humeus met daaronder blond schoon zand (figuur 9).



Figuur 9 Zij aanzicht van het talud in de Waterleiding van Barchem

In figuur 10 is een boorkolom van de slootbodembodem weergegeven. De bovenste 5 cm is bruin van kleur, vervolgens wordt het materiaal zwart van kleur. Het zwarte humeuze materiaal stinkt, wat duidt op anaerobe omstandigheden. Op 40 cm diepte is het schone zand duidelijk zichtbaar.



Figuur 10 Boorkolom van de bodem in de Waterleiding van Barchem

De baggerlaag boven en beneden de stuw vertoont een grote overeenkomst. Aanvankelijk was het idee dat voor de stuw meer slib zou accumuleren dan voorbij de stuw (Wit *et al.* 1987), dit blijkt echter niet uit de dikte van de sliblaag. In natte perioden, waarin waarschijnlijk de grootste slibaanvoer plaatsvindt, is de stuw veelal gestreken, daarnaast staat de stuw er nog niet zo lang (1995 geplaatst). Dit is waarschijnlijk de oorzaak dat geen duidelijk verschil wordt gevonden in dikte van de sliblaag voor en na de stuw.

Ook in de Breede Graven (kruising Wildenborchse weg) is een sleuf gegraven. Dit deel van de waterloop ligt duidelijk hoger in het landschap. Hier staat slechts sporadisch water in de leiding (mondelinge mededeling Te Beest), de slootbodembodem is dan ook dichtgegroeid met gras. We treffen hier geen slappe bodemlagen aan. De bodem is stevig. Bij het graven blijkt de bovenste 5 cm van het profiel bruin (bodenvorming) en vervolgens wordt schoon, blond zand aangetroffen. Op de andere locatie, meer benedenstooms, in de Brede Graven wordt wel een dikke baggerlaag aangetroffen.

4.3 Laboratoriumonderzoek

In het laboratorium is op 3 manieren aanvullend onderzoek gedaan met betrekking tot de intreeweerstand, nl.:

- analyse slibmonster,
- k-waarde bepaling ahv ongestoorde monsters,
- imitatie slootprofiel mbv aquariumbak.

4.3.1 Metingen

4.3.1.1 Analyse monsters

Op de 3 locaties (figuur 7) zijn in totaal 6 monsters genomen van het bodemmateriaal. De monsters zijn in Oosterbeek geanalyseerd.

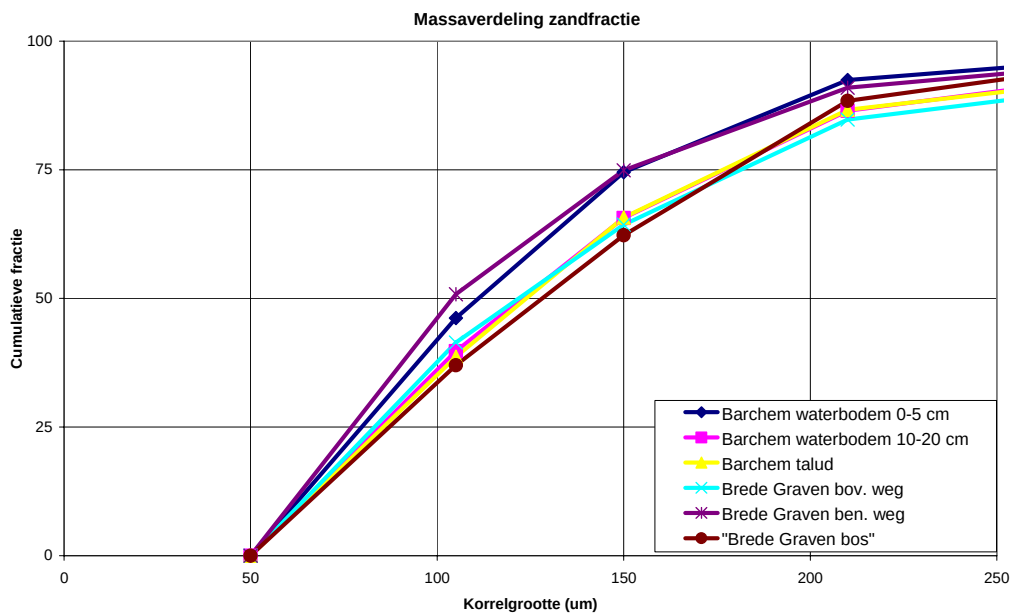
Tabel 1 Samenvatting van de bodemtypen volgens de bodemkaart 1 : 50 000 nabij de monsterlocaties.

Locatie	laag	Bodemkaart	1e cijfer	2e cijfer
1a= Waterleiding van Barchem benedenstrooms stuw C	Bodem	pZn23 V*	M50<210 µm	lemig
1b= Waterleiding van Barchem benedenstrooms stuw C	Bodem	pZn23 V*	M50<210 µm	lemig
1c= Waterleiding van Barchem benedenstrooms stuw C	Talud	pZn23 V*	M50<210 µm	lemig
3a=Brede Graven bovenstrooms Wildenborchse weg	Bodem	pZg23 III	M50<210 µm	lemig
3b=Brede Graven benedenstrooms Wildenborchse weg	Bodem	pZn23 V*	M50<210 µm	lemig
4=Brede Graven bos	Bodem	pZn23 V*	M50<210 µm	lemig

Tabel 2 Samenvatting van de bodemtypen analyseresultaten van de monsterlocaties.

Locatie	Laag	Org. stof	Lutumgehalte	Leemgehalte	M50
1a	Bodem	5,6 zeer humeus	0,7 kleiarm zand	30,1 sterk lemig zand	zeer fijn zand
1b	Bodem	5,1 zeer humeus	4,7 kleiarm zand	15,7 zwak lemig zand	zeer fijn zand
1c	Talud	5,0 zeer humeus	5,7 kleiig zand	31,2 sterk lemig zand	zeer fijn zand
3a	Bodem	3,1 matig humeus	7,4 kleiig zand	27,1 sterk lemig zand	zeer fijn zand
3b	Bodem	7,9 zeer humeus	10,5 zeer lichte zavel	50,2 zandige leem	uiterst fijn zand
4	Bodem	9,5 humusrijk	8,1 zeer lichte zavel	30,3 sterk lemig zand	zeer fijn zand

In vergelijking met de eigenschappen van naastliggende bodems geven de analyses de indruk dat het materiaal fijner is en het leemgehalte relatief hoog is.



Figuur 11 Cumulatieve zandfractie van enkele waterbodems en een talud in de omgeving van de Wildenborch

Uit figuur 11 blijkt dat het M50-cijfer van de zandfractie van de monsters weinig varieert, nl tussen ca 100-130 µm, dat overeenkomt met uiterst fijn tot zeer fijn zand.

Vergelijking van de gegevens met beschrijvingen van monsters uit het Bodemkundig Informatie Systeem (Bijlage 2) geeft aan dat gemiddeld genomen het organisch stofgehalte en het lutumgehalte van het bodemslib sterk overeenkomt met de eigenschappen van de bovenste bodemhorizonten in de omgeving. Het leemgehalte in verschillende horizonten varieert sterk, globaal tussen 5-65 %. Het M50-cijfer van het zand uit het bodemslib is overwegend fijner (100-130 µm) dan het zand in de bovenste bodemhorizont (130-150 µm). Het materiaal vertoont dus een zekere overeenkomst met de bodems in de omgeving, waarbij door watertransport vooral het fijnere materiaal tot afspoeling komt.

4.3.1.2 k-waarde bepaling

Op 5 locaties zijn ongeroerde monsters gestoken van de slootbodem voor de bepaling van de doorlatendheid. Deze monsters zijn naar het laboratorium vervoerd en vervolgens van onderaf verzadigd. De monsters hadden een diameter van resp 20 cm (metalen ring) en 19 cm (kunststof ring) en een hoogte van 20 cm. Op het moment dat de monsters zijn gestoken stond de sloot droog. De monsters zijn genomen op de volgende locaties:

- Bodem Waterleiding van Barchem (Ra);
- Talud Waterleiding van Barchem (Rb);
- Brede Graven Bovenstrooms Wildenborchse weg (Rc);
- Brede Graven Benedenstrooms Wildenborchse weg (Rd);
- Brede Graven bos (Re).

Aan deze monsters is de doorlatendheid bepaald.

Tabel 3 Gemeten doorlaatfactoren van slootbodemonsters in de omgeving van de Wildenborch

Monster	Metingen 25-11-1999			Metingen 29 en 30-11-1999		
	Aantal	k_{gem} (m/d)	St. dev	Aantal	k_{gem} (m/d)	St. dev
Ra	4	0,27	0,11	3	0,07	0,02
Rb		Niet meetbaar door hoge doorlatendheid monster				
Rc	3	2,28	0,41	4	1,52	0,46
Rd	4	0,49	0,11	5	0,61	0,10
Re	6			6	18,85	3,83

Monster Rb is genomen van het talud dat was begroeid met gras, waarschijnlijk is de aanwezigheid van graszode in het monster de oorzaak dat het gestoken monster geen goede aansluiting geeft op de ringwand, waardoor kortsluitstroming ontstaat. Voor monster Re geldt dat deze is gestoken langs een bosrand (blad en takjes, wortels bomen), verder is de waterloop ter plaatse veel breder dan meer bovenstrooms. Het monster is humeuzer dan de rest, dit kan de oorzaak zijn van de hogere doorlatendheid. Ter plaatse van Rc is de baggerlaag relatief dun, waarmee ook een deel van de oorspronkelijke ondergrond mee is bemonsterd. In monster Ra en Rd lagen na het onder waterzetten resp. 6 dode platte wormen met daarnaast allerlei kleine wormen en 6 dode regenwormen op de bodem. Ook begon in monsters Rd spontaan een paardestaart te groeien.

De gevonden doorlatendheid varieert tussen heel gering tot zeer hoog > 18 m/d. Rekening houden met de afwijkende monsters is de gemiddelde doorlatendheid van de slootbodemonster 0,3-0,4 m/d. Uitgaande van een dikte van de baggerlaag van 0,40 cm is de slootbodemonsterstand ca 1 dag.

Gezien de biologische activiteit (regenwormen, plantengroei) in de baggerlaag is het voorstelbaar, dat tijdens het droogvallen van waterlopen in de baggerlaag processen plaatsvinden, die de doorlatendheid en daarmee de intreeweerstand beïnvloeden. Als gevolg van deze processen kan de doorlatendheid groter worden, waardoor de bodemonsterstand afneemt. Het droogvallen en het slootbeheer maken het ook mogelijk dat de bodemonsterstand in de tijd kan variëren.

4.3.2 Laboratoriumopstelling



Figuur 12 Laboratoriumopstelling voor onderzoek aan de slootbodem

In het laboratorium is een opstelling gemaakt om de veldsituatie na te bootsen (figuur 12) ten einde hiermee onder geconditioneerde omstandigheden metingen te kunnen verrichten. De hoofddoelstelling was het nader analyseren van het effect van een dunnere sliblaag op het talud in vergelijking met de sliblaag op de bodem op de totale intreeweerstand. Hiervoor is een aquariumbak gemaakt met een lengte van 120 cm, een breedte van 20 cm en een hoogte van 60 cm. Het materiaal om een intreeweerstand aan te brengen is in najaar van 1999 verzameld uit een drooggevallede waterloop in de omgeving van de Wildenborch.

Voor de metingen is de bak eerst opgevuld met een laag fijn grind (figuur 12), vervolgens is een laag schoon zand aangebracht met daarop een laag van enkele centimeters materiaal uit de waterloop. In een hoek van de bak is een talud aangebracht, waarop de dikte van de bagger afneemt en in het bovenste deel ontbreekt.

Op de bodem van de bak is een geperforeerde buis gelegd die door middel van een slang was verbonden met een niveauvat. Het niveauvat wordt op peil gehouden door een waterpomp, verder bevindt zich in het niveauvat een overloop, zodat het niveau constant kan worden gehouden.

Het gebruikte baggermateriaal heeft een periode opgeslagen gelegen. Nadat de bak was opgevuld met materiaal is deze langzaam van onderen gevuld met water om de lucht uit te drijven. Tijdens de bevochtiging van het gebruikte baggermateriaal kwamen verschillende wormen etc te voorschijn, ook ontkiemden verschillende planten en vormden zich draadalgen (figuur 12). Zowel de draadalgen als de planten zijn niet verwijderd om de natuurlijke omstandigheden zoveel mogelijk na te bootsen.

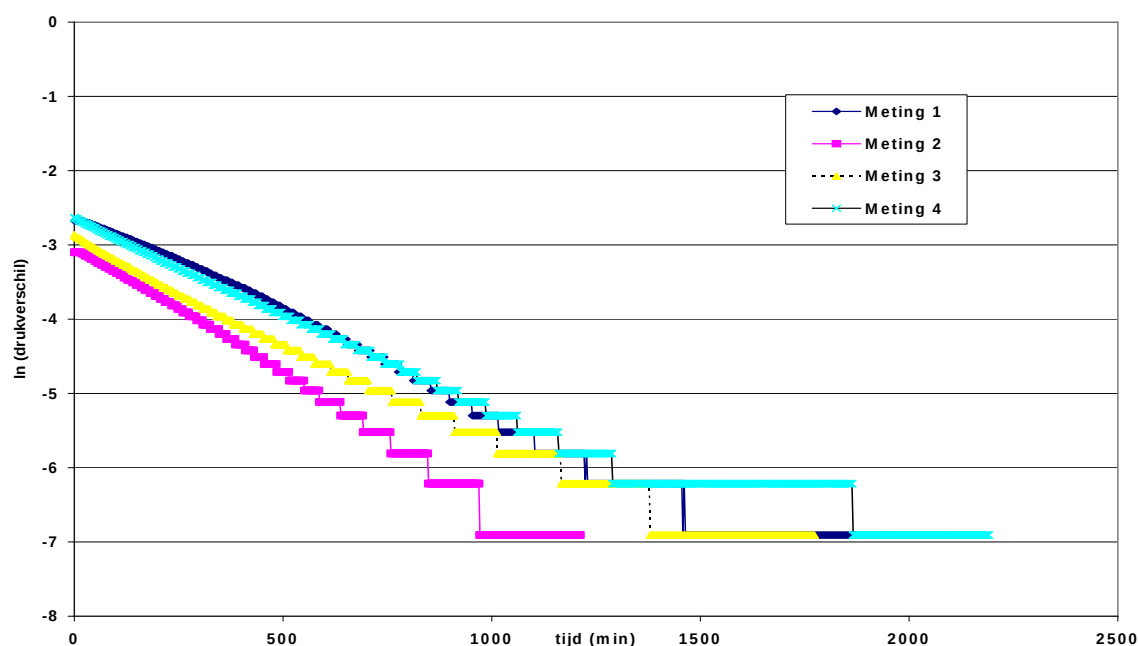
Om het waterniveau te meten is een vlotterconstructie op de bak geplaatst, met een meetinrichting, waarbij elke 3 minuten een meting is uitgevoerd. De metingen zijn doorgezet tot het niveau niet meer veranderde. Dit niveau wordt beschouwd als druk aan de onderzijde van de sliblaag.

Achtereenvolgens zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- meting 1 verlaging waterspiegel, bodem geheel onder water;
- meting 2 verdere verlaging waterspiegel, bodem valt gedeeltelijk droog;
- meting 3 verhoging waterspiegel, bodem gaat onder water;
- meting 4 verhoging waterspiegel, bodem geheel onder water.

4.3.2.1 Meetresultaten laboratoriumopstelling

In figuur 13 zijn de uitzakkingsverlopen voor de vier metingen weergegeven. Alle vier vertonen een typisch uitzakkingsverloop. Het drukverschil bij de aanvang van de proef verschilt. Het uitzakkingsverloop is in figuur 13 logaritmisches uitgezet.



Figuur 13 Uitzakkingsverloop gedurende 4 meetproeven met de laboratoriumopstelling, logaritmisches uitgezet

Uit figuur 13 blijkt dat de lijnen niet evenwijdig lopen, daarom is d.m.v. lineaire regressie over de eerste 1000 minuten de regressiecoëfficiënt bepaald.

Tabel 4 Correlatiecoëfficiënten en helling meetreeksen

Meting	Correlatie-coëfficiënt	Helling	90 % -betrouwbaarheid interval	
1	0,998	-0,00274	-0,00276	-0,00273
2	0,995	-0,00357	-0,00361	-0,00353
3	0,998	-0,0027	-0,00272	-0,00268
4	0,999	-0,00257	-0,00258	-0,00256

De helling van meting 1, 3 en 4 verschillen weinig. De helling van meting 2 is het grootst. Daar deze meting bij uitzakking is gemeten heeft deze meting gedurende een groot deel van de meettijd met een gedeeltelijk drooggevalle bodem gemeten, bij meting 3 is deze periode kort, omdat de waterspiegel snel stijgt en de bodem vervolgens volledig onder water ligt. Voor meting 3 is de helling groter, hetgeen duidt op een snellere uitzakking.

Om de gemiddelde k-waarde van de baggerlaag te bepalen is met onderstaande formule voor tijdvakken van 60 minuten de k-waarde bepaald:

$$k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_{t_1}}{h_{t_2}}$$

hierin is:

- k = gemiddelde doorlaatfactor sliblaag in m/d,
- L = dikte sliblaag in m,
- $t_2 - t_1$ = meetperiode 60/1440 dagen,
- h_{t1} =drukverschil op t_1 in m,
- h_{t2} =drukverschil op t_2 in m.

Voor de vier metingen zijn de resultaten weergegeven in tabel 4.

Tabel 5 Gemeten doorlaatfactoren met laboratoriumopstelling

Meting	Start	Eind	Delta (h)	Stijgend/ dalend	k _{gem}	k _{st.dev}
			m		m/d	m/d
1	26 juni 2000 14.54 uur	27 juni 2000 7.48 uur	0,069	D	0,20	0,047
2	29 juni 2000 7.09 uur	29 juni 19.45 uur	0,084	D	0,254	0,054
3	3 juli 2000 10.21 uur	4 juli 2000 3.12 uur	0,054	S	0,217	0,052
4	5 juli 2000 7.21 uur	5 juli 2000 22.39 uur	0,072	S	0,188	0,036

De hoogste k-waarden worden gevonden voor een gedeeltelijk droogvallende bodem (meting 2 en 3).

De gemiddelde k-waarde blijkt ongeveer 0,2 m/d te zijn. Bij het gebruik van deze k-waarde en een laagdikte van 25 cm bedraagt de weerstand ongeveer 1 dag. In het veld is veelal een laagdikte aangetroffen van 25 cm of meer.

Dat de k-waarde bij een gedeeltelijk droogvallende sloot groter is dan bij een volledige natte slootbodem lijkt op het oog tegenstrijdig maar heeft te maken met drie oorzaken, nl.:

1. Stromingsrichting,

In de formule van Ernst is de drainageweerstand opgebouwd uit de volgende weerstanden:

- Verticale weerstand: 1.2 d
- Horizontale weerstand: 7.1 d
- Radiale weerstand : 129.8 d.
- Intreeweerstand: 19.1 d.

Totaal bedraagt de drainageweerstand 157,1 d. De weerstand van de sliblaag is gesteld op 0,17 d. (bijv sliblaag van 13 cm met k-waarde 0,75 m/d), hierbij is ervan uitgegaan dat het materiaal dezelfde verticale doorlatendheid heeft als het natuurlijk afgezette materiaal. Bij deze aanpak wordt een gelijkmatig verdeelde weerstand over de natte omtrek (bodem en talud) van de waterloop verondersteld. Is de weerstand van de sliblaag echter 0,5 dagen (bijv. sliblaag van 20 cm met een k-waarde van 0,4 m/d), de natte omtrek bijv. 1 m en de slootafstand 200 m, dan bedraagt de intree-weerstand 100 d. De drainageweerstand neemt hierbij toe naar 238.1 d, dit is een toename van meer dan 50% en geeft aan dat de intree-weerstand een groot effect kan hebben op de grootte van de drainageweerstand.

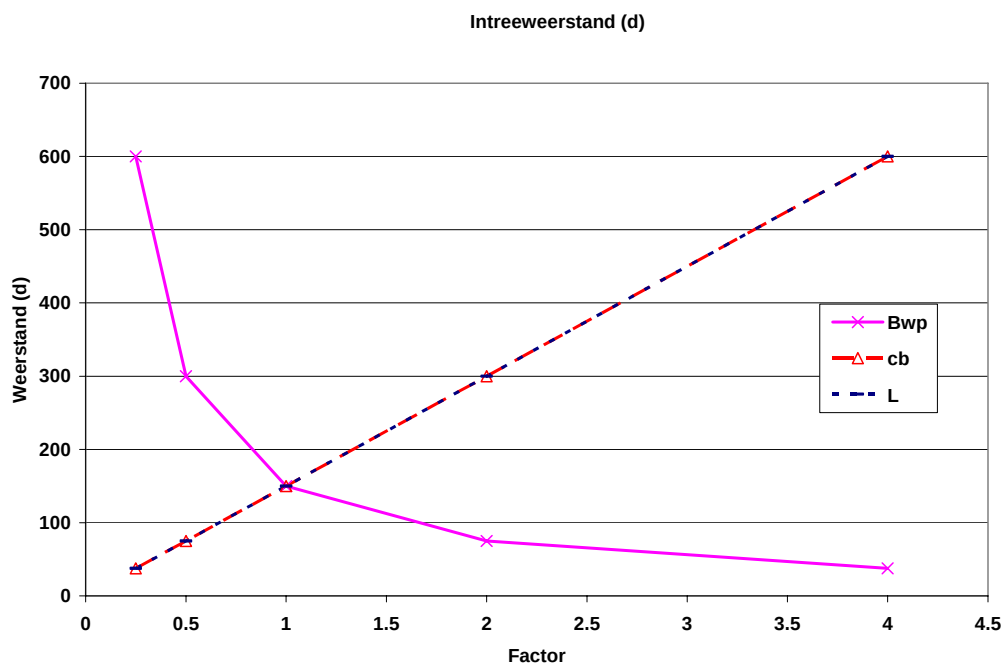
Voor vier combinaties van doorlatendheid van de sliblaag en voor twee waterpeilen zijn de intree- en drainageweerstanden uitgerekend met formule van Ernst volgens het schema in figuur 14.

Uit tabel 6 blijkt dat de variatie in k-waarde en natte omtrek grote invloed heeft op de grootte van de intree-weerstand en daarmee op de drainageweerstand.

Tabel 6 Intreeweerstanden berekend met Ernst

k-waarde sliblaag (m/d)	Bodem- weerstand (d)	Water- diepte (m)	Natte Omtrek (m)	Intree- weerstand (d)	Drainage- weerstand (d)
0,02	6	0,38	1,75	686	824
0,1	1,2	0,38	1,75	137	276
0,2	0,6	0,38	1,75	69	207
0,75	0,16	0,38	1,75	19	158
0,02	6	0	1,00	1200	1360
0,1	1,2	0	1,00	240	400
0,2	0,6	0	1,00	120	280
0,75	0,16	0	1,00	32	191

In onderstaande figuur is het effect van variatie in de parameter slootafstand (300 m), natte omtrek (1 m) en intree-weerstand (0,5 d.) weergegeven.



Figuur 15 Gevoeligheid drainageweerstand voor slootafstand (L), natte omtrek (B_{wp}) en bodemweerstand(c_b)

De verkleining van de natte omtrek leidt tot een grote toename van de intreeweerstand. Een toename van de slootafstand leidt, evenals een toename van de slootbodemweerstand tot een grotere intreeweerstand, in figuur 15 vallen de lijnen op elkaar.

4.4.2 Modflowberekeningen

Om het effect van een verschil in intreeweerstand tussen bodem en talud te simuleren zijn vervolgens een aantal modelberekeningen uitgevoerd met MODFLOW. Hiervoor is een strook grond ter breedte van 200 m gemodelleerd met in het centrum een waterloop. Deze waterloop heeft een breedte van 2,8 m aan maaiveld en 1,0 m op de bodem. Het maaiveld ligt op 10 m+NAP en de bodem op 8,87 m +NAP. Onder de bodem ligt een sliblaag ter dikte van 0,12 m.

De opbouw van de ondergrond is als volgt:

Laag 1 10 m+NAP – 5 m+NAP $k_{1x}=k_{1y}=1,5$ m/d, $k_{1z}=0,75$ m/d

Laag 2 5 m+NAP - 30 m-NAP $k_{2x}=k_{2y}=k_{2z}=20$ m/d

Er is steady state gerekend met een neerslagoverschot van 3 mm/d voor twee verschillende waterpeilen, nl.:

- volledige drainage via de bodem (Peil 8,875 m +NAP),
- waterdiepte 0,38 m (Peil 9,25 m +NAP).

Verder is gerekend met 4 verschillende doorlatendheden voor de sliblaag, nl. 0,02 m/d, 0,1 m/d, 0,2 m/d, 0,75 m/d. Op verschillende afstanden is op 2 m-mv

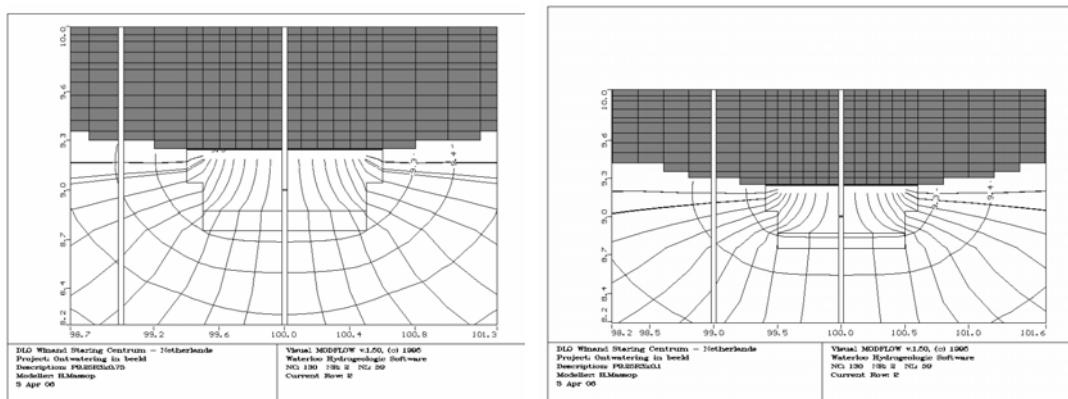
(8m+NAP) een waarnemingsfilter gedefinieerd, verder is op 9 m+NAP een waarnemingsfilter is de sloot gedefinieerd.

Tabel 7 Intreeweerstanden berekend met Modflow

Peil m+NAP	Neerslag mm/d	K _{intree} m/d	Stijghoogte in m+NAP bij afstand				Weerstand (d)		
			0 m	1 m	5 m	90 m	Intreew*	Drainage	Verschil
9,762	3	0,02	9,895	9,909	10,002	10,104	44	114	70
9,050	3	0,1	9,317	9,335	9,456	9,556	89	169	80
8,952	3	0,2	9,264	9,284	9,411	9,510	104	186	82
droog	3	0,75	9,218	9,240	9,371	9,470			
9,250	3	0,02	9,597	9,606	9,710	9,815	116	188	72
9,250	3	0,1	9,554	9,566	9,673	9,777	101	176	75
9,250	3	0,2	9,533	9,545	9,655	9,758	94	169	75
9,250	3	0,75	9,502	9,517	9,628	9,731	84	160	76

*Incl. een deel radiale weerstand

De berekende drainageweerstand met MODFLOW, in het geval dat de doorlatendheid van de sliblaag overeenkomt met de doorlatendheid van de oorspronkelijke afzettingen, is gelijk aan de drainageweerstand uit de analytische benadering. De berekende intreeweerstand op basis van de stijghoogte direct onder slootbodem geeft, bij aanwezigheid van een bodemweerstand, een te grote waarde voor de intreeweerstand. Mogelijk is de intree- en de radiale weerstand niet geheel te scheiden door gebruik te maken van de berekende stijghoogte direct onder de slootbodem. Deze grote waarde wordt verder veroorzaakt doordat als gevolg van een verschil in weerstand tussen bodem en talud een afwijkende stromingsbeeld ontstaat, de drainage is niet gelijkmatig over het natte profiel verdeelt. De waterstroming door de bodem neemt af ten koste van het talud (figuur 16). De weergegeven intreeweerstand, in tabel 7 is derhalve niet representatief. In figuur 16 is goed te zien dat naarmate de doorlatendheid van de sliblaag afneemt er meer water via het talud intreedt. Er vindt in die situatie geen zuivere radiale stroming meer plaats. Uit tabel 6 in vergelijking met tabel 7 blijkt dat bij lagere k-waarden van de sliblaag de intreeweerstand toeneemt. De toename van de intreeweerstand is bij een verschil in dikte van de sliblaag tussen bodem en talud minder dan op basis van een uniforme weerstand van de sliblaag over de natte omtrek mag worden verwacht.



Figuur 16 Gemodelleerd stromingsbeeld met MODFLOW in de omgeving van de waterloop bij k -waarde sliblaag 0.75 m/d (links) en 0.1 m/d (rechts), niet verzadigd (incl. boven maaiveld) is grijs

Dit geeft dus tevens aan dat het in het veld lastig is om direct de intreeweerstand te meten, omdat de potentiaal mede wordt beïnvloed door de radiale stroming.

In tabel 8 is voor verschillende grondwateraanvullingen de intreeweerstand en de drainageweerstand berekend.

Tabel 8 Intreewestanden berekend met Modflow voor variabele neerslagen

Peil m+NAP	Neerslag mm/d	K_{intree} m/d	Stijghoogte in m+NAP bij afstand				Weerstand (d)	
			0 m	1 m	5 m	90 m	Intree	Drainage
9,25	0,5	0,2	9,298	9,300	9,319	9,336	96	172
9,25	1	0,2	9,345	9,350	9,387	9,422	95	172
9,25	2	0,2	9,439	9,448	9,521	9,591	95	170
9,25	3	0,2	9,533	9,545	9,655	9,758	94	169
9,25	4	0,2	9,625	9,642	9,786	9,924	94	168
9,25	5	0,2	9,716	9,737	9,915	Mv	93	167

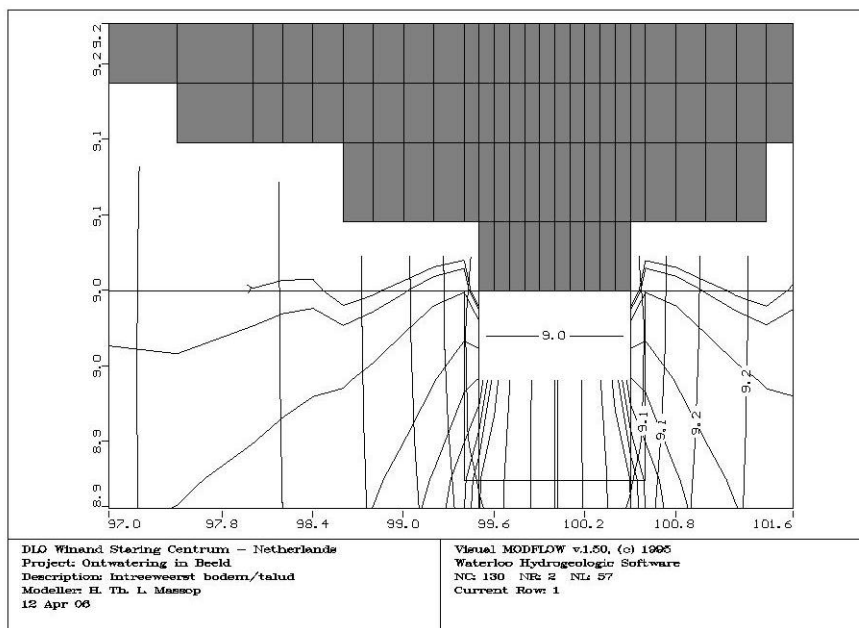
Uit tabel 8 volgt dat de grootte van het neerslagoverschot nauwelijks invloed heeft op de grootte van de intreeweerstand en de drainageweerstand. Door het peil constant te houden blijft het stromingsbeeld gelijk, alleen de flux neemt toe.

Om het verschil in effect van een intreeweerstand geconcentreerd op de bodem (B) van de waterloop met een intreeweerstand gelijkmatig verdeeld over de bodem en het talud te onderzoeken zijn eveneens enkele Modflowberekeningen gemaakt, de resultaten zijn in tabel 9 weergegeven. Bij de berekeningen is een vast peil in de waterloop aangehouden van 9.00 m+NAP, de neerslagaanvulling bedraagt 2 mm/d.

Tabel 9 Intreeweerstanden berekend met Modflow voor variabele intreeweerstanden en onderscheiden naar intreeweerstand op bodem waterloop (B) en bodem en talud (B/T)

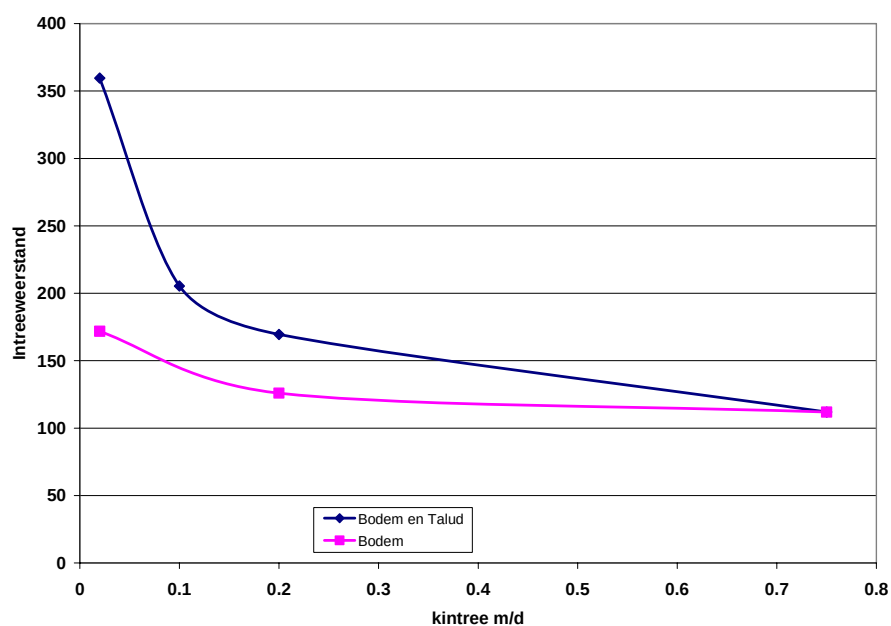
Neerslag	Bodem /Talud	K _{intree}	Peil	Stijghoogte in m+NAP bij afstand				Weerstand (d)		
				0 m	1 m	5 m	90 m	Intree	Drainage	Verschil
2	B/T	0,02	9,000	9,719	9,729	9,810	9,879	360	439	79
2	B/T	0,1	9,000	9,411	9,423	9,507	9,575	205	287	82
2	B/T	0,2	9,000	9,339	9,352	9,437	9,505	169	253	84
2	B/T	0,75	9,000	9,224	9,237	9,322	9,389	112	195	83
2	B	0,02	9,000	9,344	9,352	9,433	9,502	172	251	79
2	B	0,2	9,000	9,252	9,263	9,347	9,415	126	208	82

De intreeweerstand is berekend uit het drukverschil direct onder de slootbodem (0 m) en het waterpeil. Het drukverschil tussen 0 en 90 m is nagenoeg constant. Een verlaging van de k-waarde met een factor 2 resp. 10 (van 0,2 naar 0,1 resp 0,02 m/d) geeft een berekende verhoging van de intreeweerstand met slechts 21 en 112%. Dat de weerstand niet lineair toeneemt, komt doordat boven het waterpeil een kwelvlak ontstaat, zie figuur 17.



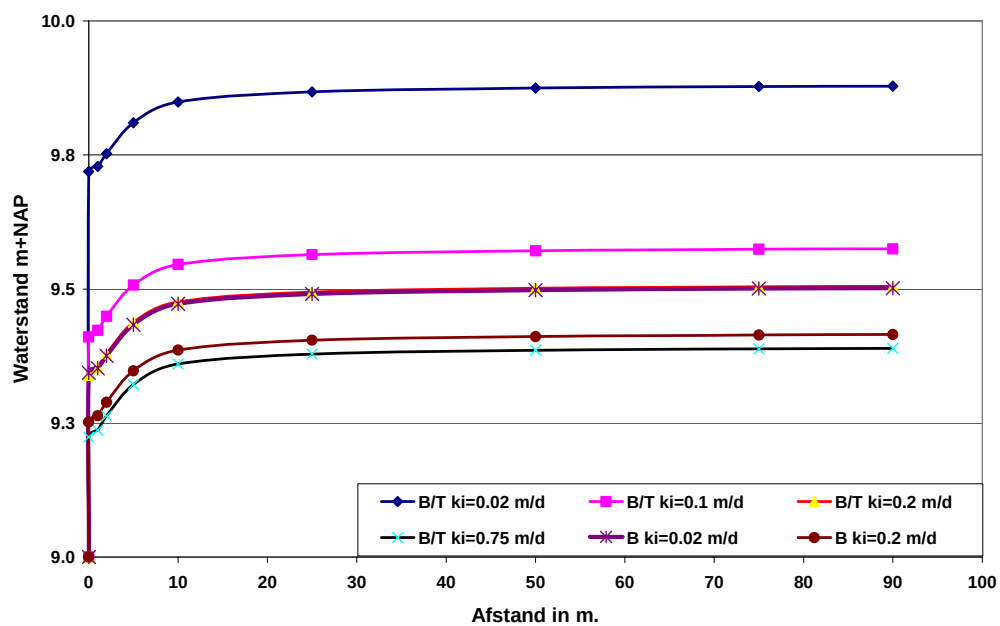
Figuur 17 Ontstaan van een kwelvlak boven de waterspiegel, niet verzadigd (boven waterspiegel) is grijs

De afname van de intreeweerstand in relatie tot de k-waarde is weergegeven in figuur 18. Ook hieruit blijkt dat het verband tussen de k-waarde en de intreeweerstand niet lineair is.



Figuur 18 Relatie tussen de k -waarde van de slootbodemweerstandslaag en de intreeweerstand

Het verloop van de grondwaterstand op korte afstand van de sloot tot het midden van het perceel wordt niet beïnvloed door de grootte van de intreeweerstand. In dit voorbeeld is de verlaging gering hetgeen overeenkomt met het tafelmodel waarbij de drainageweerstand voor het grootste deel nabij de waterloop is geconcentreerd.



Figuur 19 Grondwaterstandsverloop loodrecht op de waterloop voor verschillende waarden van de intreeweerstand

5 Intreeweerstand, landsdekkend ingevuld

In hoofdstuk 4 is aangetoond dat er een verschil is in de grootte van de intreeweerstand voor de bodem en voor het talud van de waterloop. Voor de vorming van een intreeweerstand is verder de beschikbaarheid van materiaal (slib en lutum) van belang. Allereerst wordt in paragraaf 5.1 een kansenkaart gepresenteerd die de kans op vorming van een intreeweerstand via afspoeling over het maaiveld ruimtelijk weergeeft. Met de beschikbare informatie uit dit rapport aangevuld met kaarten en informatie uit het project “Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken” (Van der Gaast *et al*, 2006) is het mogelijk om landsdekkende kaarten te maken voor de grootte van de intreeweerstand (paragraaf 5.2).

5.1 Potentie voor de vorming van een intreeweerstand via materiaalaanvoer door stroming over het maaiveld

Bij de definitie van intreeweerstand is aangegeven dat deze gedeeltelijk wordt gevormd door afzetting van materiaal op de oorspronkelijke slootbodembodem. Voor de afzetting en vorming van een intreeweerstand is dus materiaalaanvoer noodzakelijk. Als een belangrijke aanvoerbron kan de afspoeling via het maaiveld worden gezien.



Figuur 20 Plasvorming op maaiveld (foto J.G. te Beest)

Dit betekent dat de bodemkaart bruikbaar is als indicatie voor het type materiaal dat wordt afgezet op de slootbodem. Omdat de beschikbaarheid van fijn materiaal in de vorm van lutum en leem een belangrijke factor is bij de vorming van een intreeweerstand, is de bodemkaart geclassificeerd naar beschikbaarheid leem en lutum. Naast het bodemmateriaal kunnen de maaiveldshelling en de doorlatendheid van de toplaag (maaiveldsdrainage) worden gezien als factoren die meebepalen of er veel of weinig materiaal kan inspoelen in de sloot. De factoren, die de kans op materiaaltransport en daarmee de vorming van een intreeweerstand tot uitdrukking brengen, zijn als volgt geïdentificeerd:

- Samenstelling bodemmateriaal aan maaiveld,
- Doorlatendheid bodem aan maaiveld,
- Maaiveldshelling.

Om de samenstelling van het bodemmateriaal aan maaiveld te classificeren is de bodemkaart vertaald naar PAWN-eenheden volgens de schematisatie van Wösten *et al*, 1988). Voor elke PAWN-eenheid is de bodemfysische eenheid bekend die aan maaiveld voorkomt. In tabel 10 is voor de 21 PAWN-eenheden de ondiepste bouwsteen alsmede het bijbehorende leem- of lutumgehalte weergegeven. Gronden met minder dan 10% leem zijn geclassificeerd als geringe kans op vorming van een intreeweerstand, en 10-18 als matige kans op vorming van een intreeweerstand, en meer als 18% leem als veel kans op vorming van een intreeweerstand. Omdat klei (lutum) een groter effect heeft op de doorlatendheid dan leem, is een kleigehalte < 8 beschouwd als een matige kans op de vorming van een intreeweerstand en > 8 als veel kans op vorming van een intreeweerstand. In tabel 10 is per PAWN-eenheid weergegeven of het bodemmateriaal veel fijne delen bevat, die kunnen bijdragen aan de vorming van een intreeweerstand. Tevens is in deze tabel aangegeven de doorlaatfactor van deze toplaag. De omschrijving van het materiaal is gebruikt om deze te vergelijken met de “Rijtema-gronden”(Cultuurtechnisch Vademecum, 1988), de grond die qua omschrijving het beste overeenkomt is gebruikt om de k_{sat} waarde af te leiden. Voor deze studie is vooral de k_{sat} -waarde van het materiaal van belang. De k_{sat} -waarde van de Rijtema-gronden hebben een logische opbouw, deze is voor de k_{sat} waarden niet altijd terug te vinden bij de Staringreeks, daarom is gekozen om k_{sat} waarden toe te kennen op basis van Rijtema-gronden.

Een geringe doorlatendheid van de bodem kan snel aanleiding geven tot plasvorming, waardoor de kans op stroming over het maaiveld toeneemt. In tabel 10 is daarom een kolom opgenomen met de doorlatendheid van de toplaag. Een doorlatendheid < 10 cm/dag is als laag beschouwd, een doorlatendheid > 1 m/dag als groot. De doorlatendheid tussen 0,1 en 1,0 m/dag is als gemiddeld genomen. Voor de studie Monitoring verdroging (Van der Gaast *et al*, 2005) zijn een aantal kaarten gemaakt mbt de ruimtelijke variatie van het maaiveld. Uit het AHN25 is een hellingkaart afgeleid (Helling), deze kaart is vervolgens gemiddeld voor een window van 3 grids. Hiermee wordt de maaiveldshelling op korte afstand in beeld gebracht. Voor de classificaties zijn de volgende grenzen gehanteerd:

< 17.5	Geringe helling
17.5-32.5	Gemiddeld helling
> 32.5	Grote helling

Tabel 10 Vertaling PAWN-eenheden naar doorlaatfactor en leem/ lutumgehalte toplaag

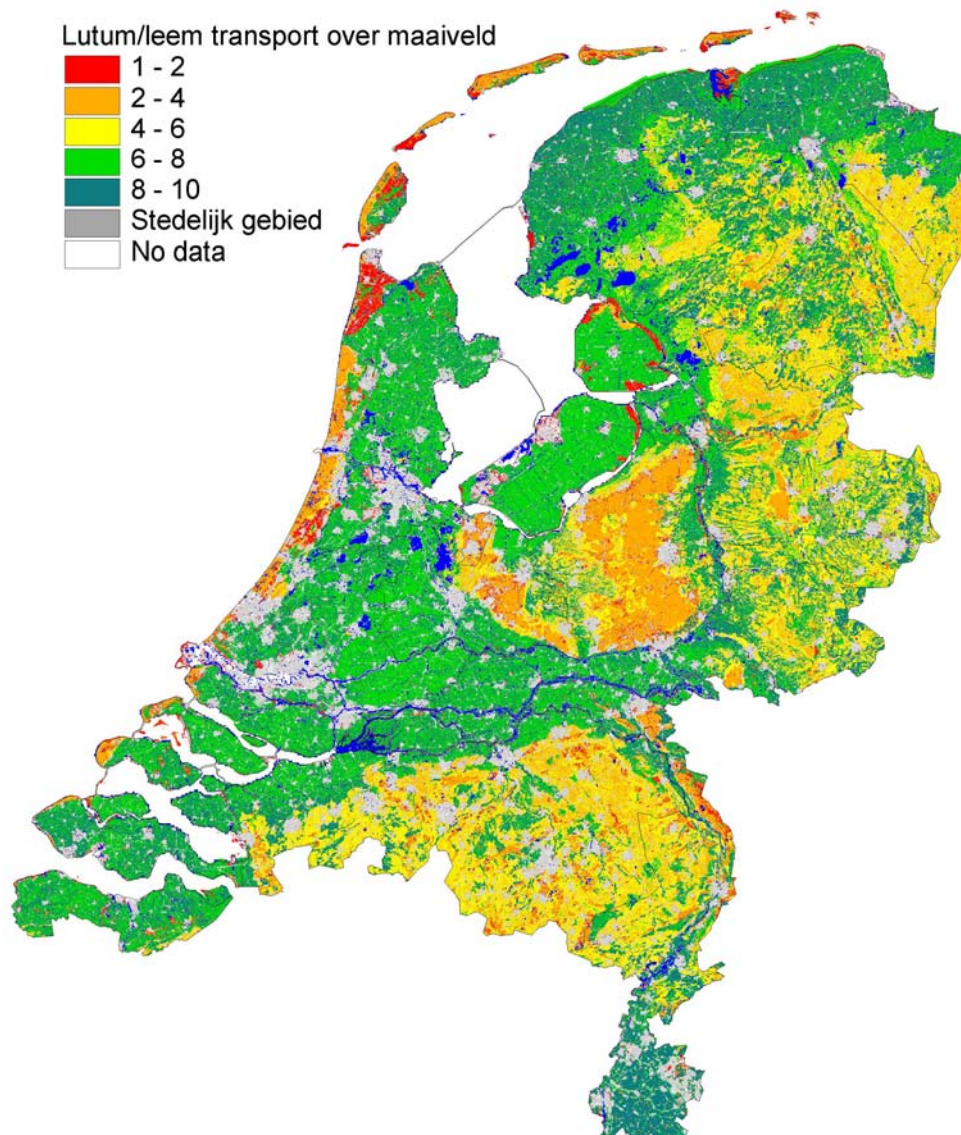
Pawn	Bouwsteen Maaiveld	Percentage leem	Percentage lutum	Bron klasse	Leem/lutum Klasse	Rijtema	k _{sat} (cm/d)	k _{sat} Klasse
1	B18		8-100	K3	Veel	R20	5,3	Laag
2	B16		0-8	K1	Matig	R20	5,3	Laag
3	B11		35-50	K3	Veel	R18	1,3	Laag
4	B11		35-50	K3	Veel	R18	1,3	Laag
5	B2	10-18		L2	Matig	L2	70	Matig
6	B18		8-100	K3	Veel	R20	5,3	Laag
7	O1	0-10		L1	Gering	R4	50	Matig
8	B1	0-10		L1	Gering	R4	50	Matig
9	B2	10-18		L2	Matig	L2	70	Matig
10	B2	10-18		L2	Matig	L2	70	Matig
11	B3	18-33		L3	Veel	L3	1	Laag
12	B2	10-18		L2	Matig	L2	70	Matig
13	B3	18-33		L3	Veel	L3	1	Laag
14	B1	0-10		L1	Gering	R4	50	Matig
15	B8		12-18	K2	Veel	R15	1,5	Laag
16	B10		25-35	K3	Veel	R17	3,5	Laag
17	B12		50-100	K4	Veel	R18	1,3	Laag
18	B12		50-100	K4	Veel	R18	1,3	Laag
19	B8		12-18	K2	Veel	R15	1,5	Laag
20	B8		12-18	K2	Veel	R15	1,5	Laag
21	O15	85-100		L4	Veel	R13	5	Laag

De aldus afgeleide kaarten zijn vervolgens gewogen volgens tabel 11, hiervoor is de systematiek toegepast zoals beschreven door Van der Gaast *et al*, (2002).

Tabel 11 Beschikbaarheid van fijn materiaal ivm vorming intreeweerstand

Bron	K _{sat}	Helling		
		Groot >32,5	Gemiddeld 17,5-32,5	Gering <17,5
Veel	Laag (<10 cm/d)	10	9	8
	Leem >18% Gemiddeld (10-100 cm/d)	8	7	6
	Lutum >8% Hoog (> 100 cm/d)	6	5	4
Gemiddeld	Laag (<10 cm/d)	8	7	6
	Leem 10-18% Gemiddeld (10-100 cm/d)	6	5	4
	Lutum <8% Hoog (> 100 cm/d)	4	3	2
Weinig	Laag (<10 cm/d)	6	5	4
	Gemiddeld (10-100 cm/d)	4	3	2
	Leem < 10 % Hoog (> 100 cm/d)	2	1	0

Op basis van deze tabel is een kaart afgeleid die informatie geeft over de kans dat fijn materiaal via het maaiveld naar de sloot wordt getransporteerd en bijdraagt aan de vorming van een intreeweerstand.



Figuur 21 Kans op aanvoer van fijn materiaal via maaiveld

Uit figuur 21 blijkt dat de kans op aanvoer van fijn materiaal over maaiveld het grootst is in laag Nederland, vanwege het vlakke maaiveld, de geringe verzadigde doorlatendheid van de bodem aan maaiveld en het veelal hoge lutumgehalte (klei) van de toplaag. Ook in hoog Nederland komen hellende gebieden voor met geringe doorlatendheid van de toplaag en hoog leemgehalte (zand).

5.2 Landelijk beeld van de intreeweerstand

Alvorens wordt ingegaan op een landelijk kaart voor de intreeweerstand, worden aan de hand van exemplarische voorbeelden voor een zand, klei en veen profiel de grootte van de intreeweerstand ingeschat (tabel 12).

Tabel 12 Intreeweerstand voor klei, zand en veen.

Materiaal	B_{wp} m	L m	L/B_{wp}	q mm/d	Dikte cm	k cm/d	c_b d	c_i d	Opbolling cm
Klei	3	300	100	0.2	10	3	3	300	30
Zand	1	150	150	2	20	20	1	150	30
Veen	5	50	10	2	10	5	2	20	4

De verhouding tussen de natte omtrek en de slootafstand is het kleinst voor veengebieden, hier liggen vaak relatief brede sloten en is de slootafstand gering. De sloten in het kleigebied zijn breder dan in het zandgebied. De afvoer naar de sloten is kleiner in het kleigebied, vanwege de geringe doorlatendheid. In kleigebieden is veelal buisdrainage aanwezig, meer dan in respectievelijk de zand- en veengebieden. De dikte van de sliblaag is in het zandgebied dikker verondersteld dan in kleigebieden, vanwege de maaiveldhoogteverschillen en het onderhoud. De k-waarde is gerelateerd aan het materiaal, hieruit kan een weerstand worden ingeschat van de sliblaag, rekening houdend met de verhouding natte omtrek/slootafstand en is een globale grootte van de intreeweerstand te bepalen. Deze is het grootst voor de kleigronden, echter omdat slechts een beperkt deel van het neerslagoverschot via waterlopen wordt gedraineerd is de resulterende opbolling beperkt. In zandgebieden speelt de intreeweerstand een aanzienlijke rol bij de bepaling van de drainageweerstand. Voor veengebieden is het aandeel van de intreeweerstand beperkt, mogelijk wordt bij veengebieden een deel van het neerslagoverschot over het maaiveld afgevoerd naar greppels. Hieruit blijkt dat vooral in zandgebieden de intreeweerstand een belangrijke factor is bij de bepaling van de drainageweerstand.

De grootte van de intreeweerstand wordt mede bepaald door een verschil in grootte van de weerstand van de bodem en het talud, hiervoor kan een alternatief voor de intreeweerstand worden afgeleid, de zogenaamde vervangingsintreeweerstand (c_i^*). Deze is als volgt afgeleid (zie tekstbox).

Uitgaande van een vervangingsweerstand:

$$C_i = L \frac{C_b}{B_{wp}} \quad (1)$$

Harmonisch gemiddelde:

$$C_b^* = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{B_j}{C_j}}{\sum_{j=1}^n B_j} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{L}{B_{wp}} C_b^* = \frac{L}{B_{wp}} \frac{\frac{B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{B_{talud}}{C_{talud}}}{\left(\frac{B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{B_{talud}}{C_{talud}} \right)} \quad (3)$$

Uitgaande van stroming door bodem en talud waterloop:

$$q_{sloot} = \frac{\Delta h * B_{wp}}{C_{sloot}} \quad (4)$$

$$q_{sloot} = q_{bodem} + q_{talud} = \frac{\Delta h * B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{\Delta h * B_{talud}}{C_{talud}} \quad (5)$$

$$\frac{B_{wp}}{C_{sloot}} = \frac{B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{B_{talud}}{C_{talud}} \quad (6)$$

$$C_i^* = L \frac{C_{sloot}}{B_{wp}} = \frac{L}{B_{wp}} \frac{B_{wp}}{\frac{B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{B_{talud}}{C_{talud}}} = \frac{L}{\frac{B_{bodem}}{C_{bodem}} + \frac{B_{talud}}{C_{talud}}} \quad (7)$$

Uitgaande van formule 7 is een landsdekkende kaart af te leiden. Voor de grootte van de intreeweerstand zijn de volgende gegevens nodig

- Slootafstand,
- Bodembreedte,
- Natte taludlengte,
- Bodemweerstand,
- Taludweerstand.

Voor de landsdekkende kaart wordt aansluiting gezocht bij de gegevens die zijn verzameld tbv het project “Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken” (Van der Gaast *et al*, 2006). Voor de slootafstand wordt gebruik gemaakt van de in het kader van deze studie afgeleide kaarten met:

- Slootlengte ontwatering,
- Slootlengte afwatering.

Voor de bodembreedte en taludlengte onder water wordt gebruikt gemaakt van de tabel met afmetingen ont- en afwateringssysteem uit dezelfde studie. Voor het bepalen van de taludlengte onder water is uitgegaan van een taludhelling van 1:1, de taludlengte is dan gelijk aan $\sqrt{2} \cdot (\text{breedte op waterspiegel} - \text{bodembreedte})$. Bij grotere waterlopen zal in de praktijk het talud vaak flauwer zijn 1:1½ tot 1:2. In tabel 13 zijn per hydrotype de gebruikte lengten weergegeven.

Tabel 13 Afmetingen van waterlopen van het ont- en afwateringssysteem in cm voor verschillende hydrotypen

Hydrotype	Breedte waterspiegel		Breedte slootbodem		Lengte talud onder water	
	Ontwa-tering	Afwa-tering	Ontwa-tering	Afwa-tering	Ontwa-tering	Afwa-tering
Betuwe-komgronden	60	244	20	189	57	78
Betuwe-stroomrugggronden	116	600	58	504	82	136
Dekzand profiel	60	252	24	190	51	88
Duinstrook	135	600	86	522	69	110
Eem en/of keileemprofiel	60	252	12	191	68	86
Keileem profiel	60	254	22	184	54	99
Keileem-Peeloo profiel	60	244	16	168	62	107
Loss profiel	60	290	36	238	34	74
Nuenengroep profiel	60	263	26	206	48	81
Oost-Nederland profiel	60	243	24	196	51	66
Open profiel	60	247	36	199	34	68
Peeloo profiel	60	351	22	282	54	98
Singraven-beekdalen	60	285	16	216	62	98
Stuwwallen	60	311	36	259	34	74
Tegelen/Kedichem profiel	60	216	22	161	54	78
Westland-C-profiel	146	600	98	514	68	122
Westland-DC-profiel	141	600	93	514	68	122
Westland-DHC-profiel	142	600	74	532	96	96
Westland-DH-profiel	142	600	86	516	79	119
Westland-D-profiel	134	600	87	514	66	122
Westland-HC-profiel	148	600	89	502	83	139
Westland-H-profiel	143	600	84	502	83	139

Om de intreeweerstand te bepalen is verder een dikte en een k-waarde noodzakelijk. Uit onderzoek wordt veelal een dikte in de orde van 20 cm voor afzetting op de bodem van de waterloop gevonden, deze dikte is aangehouden voor zowel de bodem als het talud. Voor de k-waarde van de bodemweerstand is een waarde van 0,2 m/d aangehouden. Indien de k-waarde van het oorspronkelijk materiaal lager is dan 0,2 m/d, dan is de k-waarde van het oorspronkelijke materiaal aangehouden. Voor het talud is verondersteld dat de weerstand wordt gevormd door de materiaaldikte van 20 cm van het oorspronkelijke materiaal. Om de k-waarde toe te kennen is uit de PAWN-schematisatie de k-waarde op 1,0 m-mv bepaald, hierbij is gekeken naar de omschrijving van de bouwsteen op 1,0 m-mv, voor de bepaling van de k-waarde is nagegaan welke Rijtema-grond hiermee het beste overeenkomt. Hierbij is gekozen om k-waarden volgens Rijtema te gebruiken omdat deze een logisch verloop te zien geven tussen de k-waarde en de aard van het materiaal. In tabel 14 is de k-waarde per PAWN-eenheid weergegeven.

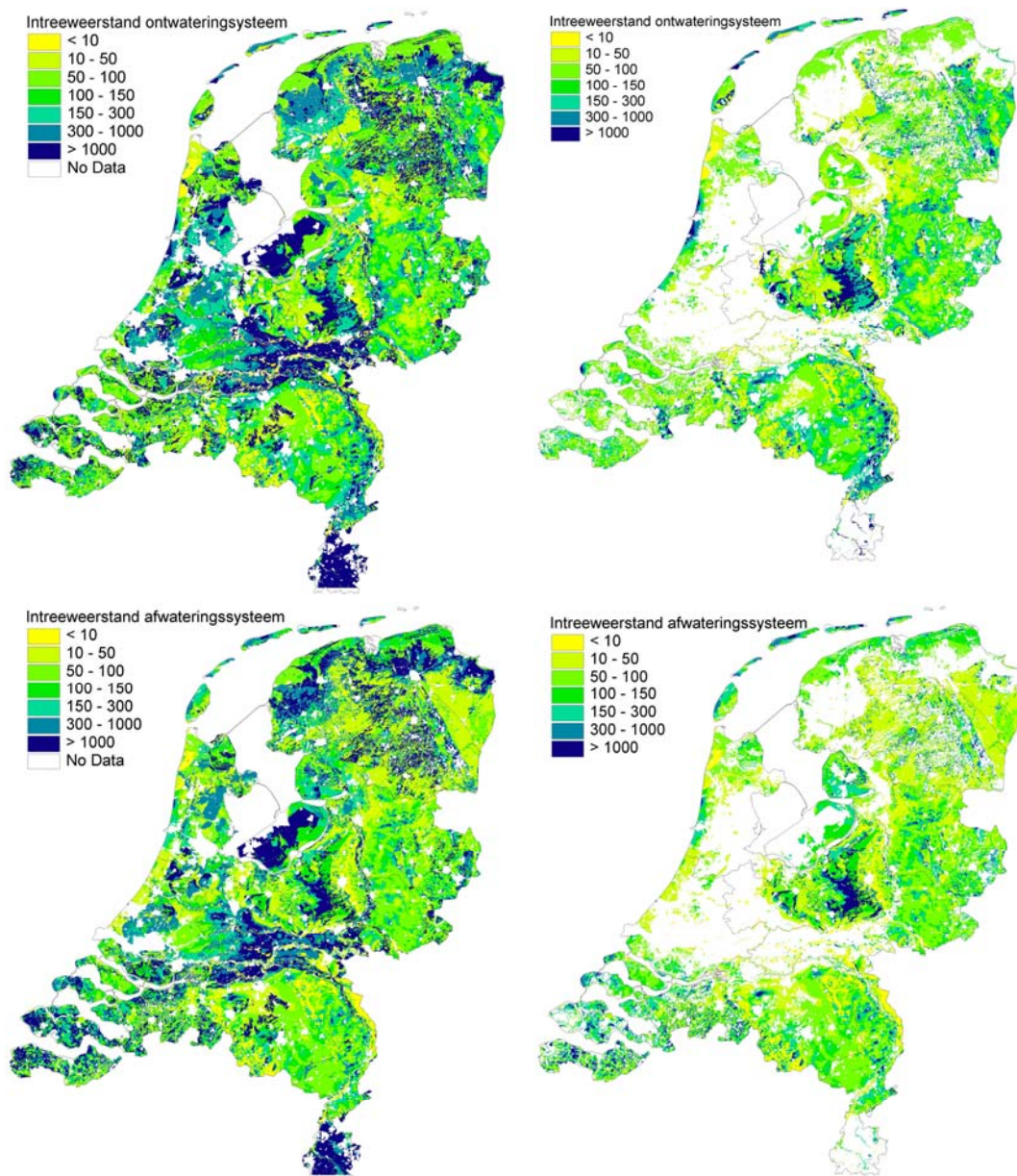
Tabel 14 K_{sat} waarden per PAWN-eenheid op 1 m -mv

PAWN-eenheid/Bodemtype	1 m-maaiveld		maaiveld
	Bouwsteen	K_{sat} cm/d	K_{sat} cm/d
1 Veengronden met veraarde bovengrond	O17	5,3	5,3
2 Veengronden met veraarde bovengrond op zand	O2	70	5,3
3 Veengronden met kleidek	O17	5,3	1,3
4 Veengronden met kleidek op zand	O2	70	1,3
5 Veengronden met zanddek op zand	O2	70	70
6 Veengronden met moerige gronden op ongerijpte klei	O12	1,3	5,3
7 Stuifzand-gronden	O1	50	50
8 Podzolgrond in leemarm, fijn zand	O1	50	50
9 Podzolgrond in zwak lemig, fijn zand	O2	70	70
10 Podzolgrond in zwak lemig, fijn zand op grof zand	O5	1120	70
11 Podzolgrond in sterk lemig, fijn zand op keileem of leem	O6	0,98	1
12 Enkeerdgrond in zwak lemig, fijn zand	O2	70	70
13 Beekeerd-grond in sterk lemig, fijn zand	O2	70	1
14 Podzolgrond in grof zand	O5	1120	50
15 Homogene zavelgronden	O9	23,5	1,5
16 Homogene, lichte kleigronden	O10	1,5	3,5
17 Kleigrond, met zware tussenlaag of ondergrond	O13	1,5	1,3
18 Kleigronden op veen	O17	5,3	1,3
19 Klei op zandgronden	O2	70	1,5
20 Klei op grof zand	O5	1120	1,5
21 Leemgronden	O15	5,0	5

Met gebruik van formule 7 zijn vervolgens landsdekkende kaarten gemaakt van de intreeweerstand.

In figuur 22 zijn voor het ontwateringssysteem en het afwateringssysteem kaarten weergegeven voor de intreeweerstand. Omdat voor een aantal gebieden de k-waarde van het bodemmateriaal op 1 m-mv $< 0,2$ m/d bedraagt, betekent dit in de berekening dat de k-waarde voor het talud en de bodem gelijk zijn. In de rechterkaarten van figuur 22 zijn deze gebieden afgedekt, aangezien deze gebieden niet voldoen aan de eerder genoemde definitie.

Uit figuur 22 blijkt dat de gebieden met lage k-waarden en dus hoge intreeweerstanden overeenkomen met de kleigebieden en gebieden met ondiepe kleilagen (keileem). Dit zijn ook de gebieden die veelal zijn gedraineerd. Daarnaast worden hoge intreeweerstanden gevonden in gestuwde gebieden, zoals de Veluwe, deze hoge weerstand kan worden verklaard door de grote slootafstand ter plaatse. Verder blijkt dat in het Pleistocene deel van Nederland er een duidelijke bijdrage is van de intreeweerstand aan de drainageweerstand. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat voor het maken van de kaarten de dikte van de weerstandslaag constant is verondersteld.



Figuur 22 Intreeweerstand voor het ontwateringssysteem (boven) en het afwateringssysteem (onder), waarbij gebieden waarvoor de k-waarde van bodem en talud gelijk is wit zijn afgedekt wit (rechts)

Conclusies

Uit inventarisatie van meetgegevens van waterschap Rijn en IJssel blijkt dat verspreid door het beheergebied, op de bodem van de waterlopen slibhoudende afzettingen worden gevonden die vaak een dikte hebben van enkele decimeters. Het organisch stofgehalte als ook het lutumgehalte is overwegend $< 5\%$. Voor de fractie $< 63\ \mu$ komen vrij hoge percentages voor.

Het veldonderzoek in de vorm van raaien heeft aangetoond, dat op de proeflocatie 'De Wildenborch' de weerstand geconcentreerd is nabij de waterloop wat overeenkomt met het zogenaamde 'tafelmodel'. In de raai tussen het Twenthekanaal en de Berkel wordt een geringe intreeweerstand voor het Twenthekanaal gevonden, terwijl voor de Berkel een duidelijk uitreeweerstand wordt waargenomen. Voor de locatie Heelweg wordt een duidelijke radiale weerstand gevonden.

Het visuele onderzoek in de omgeving van de Wildenborch heeft aangetoond dat ook hier een duidelijk laag is afgezet op de oorspronkelijk gegraven slootbodembodem, met dikten tot soms wel 40 cm. Het afgezette materiaal is fijner en leemrijker dan het materiaal van de bodems in de omgeving.

Uit nader laboratoriumonderzoek aan ongestoorde monsters blijkt dat de doorlatendheid van het slootbodemmateriaal in de orde van 0,3-0,4 m/d bedraagt. Ook uit gestoorde monsters komt een doorlatendheid van 0,2– 0,25 m/d naar voren.

Uit analytische berekeningen volgt dat in de situatie van 'De Wildenborch' de radiale en de intreeweerstand bepalend zijn voor de grootte van de drainageweerstand. De grootte van de intreeweerstand kan de grootte van de radiale weerstand benaderen en zelfs overtreffen. De invloed van de radiale weerstand is merkbaar tot een afstand van $2 \cdot D$ (pakketdikte) van de waterloop. Uit het verloop van de grondwaterstand is voor de Wildenborch af te leiden dat de weerstand heel dicht bij de waterloop zit hetgeen duidt op de aanwezigheid van een intreeweerstand.

Uit modelberekeningen blijkt dat ingeval de bodemweerstand op de bodem van de waterloop is geconcentreerd, de waterdiepte sterk bepalend is voor de grootte van de intreeweerstand. In dit geval ontstaat een afwijkend radiaal stromingsbeeld, waarbij naarmate de bodemweerstand toeneemt meer water via het talud zal intreden. Dit maakt meting van afzonderlijke waarden voor de radiale en intreeweerstand lastig. Wel is duidelijk dat de aanwezigheid van een baggerlaag effect heeft op de grootte van de drainageweerstand. Bij een intreeweerstand gelijkmatig verdeeld over bodem en talud, kan een kwelzone boven de waterspiegel ontstaan. Als gevolg van het ontstaan van deze kwelzone zal er geen lineaire toename zijn in de grootte van de intreeweerstand als gevolg van de afname in de k-waarde of dikte van de sliblaag op de bodem.

Op basis van deze bevindingen zijn de volgende aanbevelingen af te leiden, om door verder onderzoek beter grip te krijgen op de bodemweerstand van waterlopen:

- Uitbreiding van de inventarisatie van meetgegevens over dikte en samenstelling baggerlagen ter verkrijging van een landelijk beeld,
- Vergelijking van de samenstelling van baggerlagen met bodemanalyses uit de omgeving, alleen als de samenstelling verschilt van het oorspronkelijke bodemmateriaal is sprake van een extra weerstand,
- Verder onderzoek naar relatie talud – bodem,
- Naar uittreeweerstanden is nauwelijks onderzoek gedaan, de vraag is waar deze weerstanden een rol spelen.

Om een landsdekkende kaart voor de intreeweerstand te maken is een alternatieve formule afgeleid voor de intreeweerstand. Met toepassing van deze formule zijn 2 landsdekkende kaarten gemaakt voor de grootte van de intreeweerstand. In het Pleistocene deel van Nederland blijkt dat er een duidelijke bijdrage van de intreeweerstand is aan de drainageweerstand.

Literatuur

- Gaast, J.W.J. van der, H.Th.L. Massop, J. van Os, L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel en C. Kwakernaak, 2002. *Waterkansen in het SGR2. Potenties voor realisatie van de wateropgaven*. Wageningen, Alterra-rapport 558.
- Gaast, J.W.J van der., H.Th. L. Massop en G.B.M Heuvelink, 2005. *Monitoring verdroging. Methodische aspecten van meetnetoptimalisatie*. Wageningen, Alterra-rapport 1102
- Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon en I.G. Staritsky., 2006. *Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken*. Wageningen, Alterra-rapport 1339.
- Guiguer, N en T. Franz, 1996. *Visual Modflow. Version 1.5. The Integrated Modeling Environment for MODFLOW and MODPATH*.
- Jousma, G. en H. Th. L. Massop, 1996. *Intreeweerstand waterlopen. Inventarisatie en analyse*. Delft, TNO-rapport GG-R-96-15(A).
- Negenman, A. J. H., P. J. T van Bakel, H. Th. L. Massop, J. P. Weijers en P.Kiden, 1997. *Landelijke hydrologische analyse van het topsysteem (LHTS)*. Inceptierapport. Delft.
- Massop, H. Th. L., 1990. *Onderzoek aan bodemonsters Zijkanaal van de Twentbekanalen*. Bijlage A bij briefnr. 00060/WIT/BTR, d.d. 5-1-1990.
- Massop, H. Th. L., 1991. *Onderzoek aan bodemonsters uit talud Zijkanaal van de Twenthekanalen*. Bijlage B bij briefnr. 11296/WIT/EYK, d.d. 3-4-1991.
- Massop, H. Th. L. en P. A. J. W. de Wit, 1994. *Hydrologisch onderzoek naar drainageweerstanden van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland*. Wageningen, SC-DLO rapport 373.
- Massop, H. Th. L., P.C. Jansen, R. Kemmers, J.G. te Beest en J.W.J. van der Gaast, 2001. *Monitoring Landgoed "De Wildenborch". Verslag over de periode oktober 1995 - december 2000*. Wageningen, Alterra-rapport 414.
- Stuyt, L.C.P.M., 1992. *The water acceptance of wrapped subsurface drains*. Proefschrift. Meppel.
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. *Cultuurtechnisch vademecum*. Utrecht, Cultuurtechnische Vereniging.
- Werkgroep Zuid-Holland, 1987. *Wateraanvoerbehoefte Zuidhollandse Eilanden en Waarden. Peilbeheersing en bestrijding van de verzilting*. ICW-nota 1801.

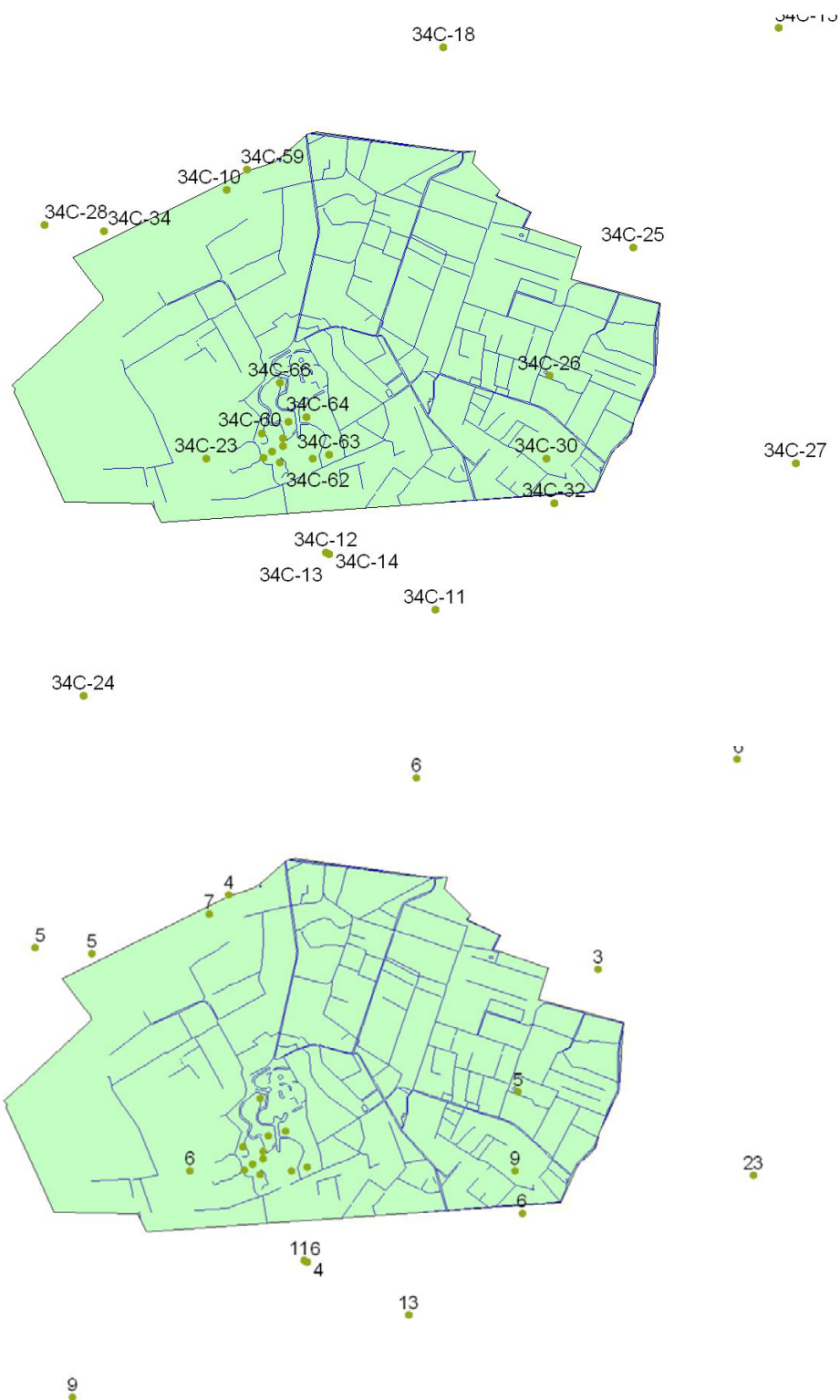
Wit, K. E., H. Th. L. Massop, J. G. te Beest en M. Wijnsma, 1987. *Hydrologische en bodemfysische parameters van het hoofdkanaal van de Twentbekanalen. (Traject Eefde-Lochem)*. Wageningen, ICW-nota 1751.

Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst, 1988. *Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1: 250 000, ten behoeve van de PAWN-studie*. Rapport 2055, Stiboka. Wageningen.

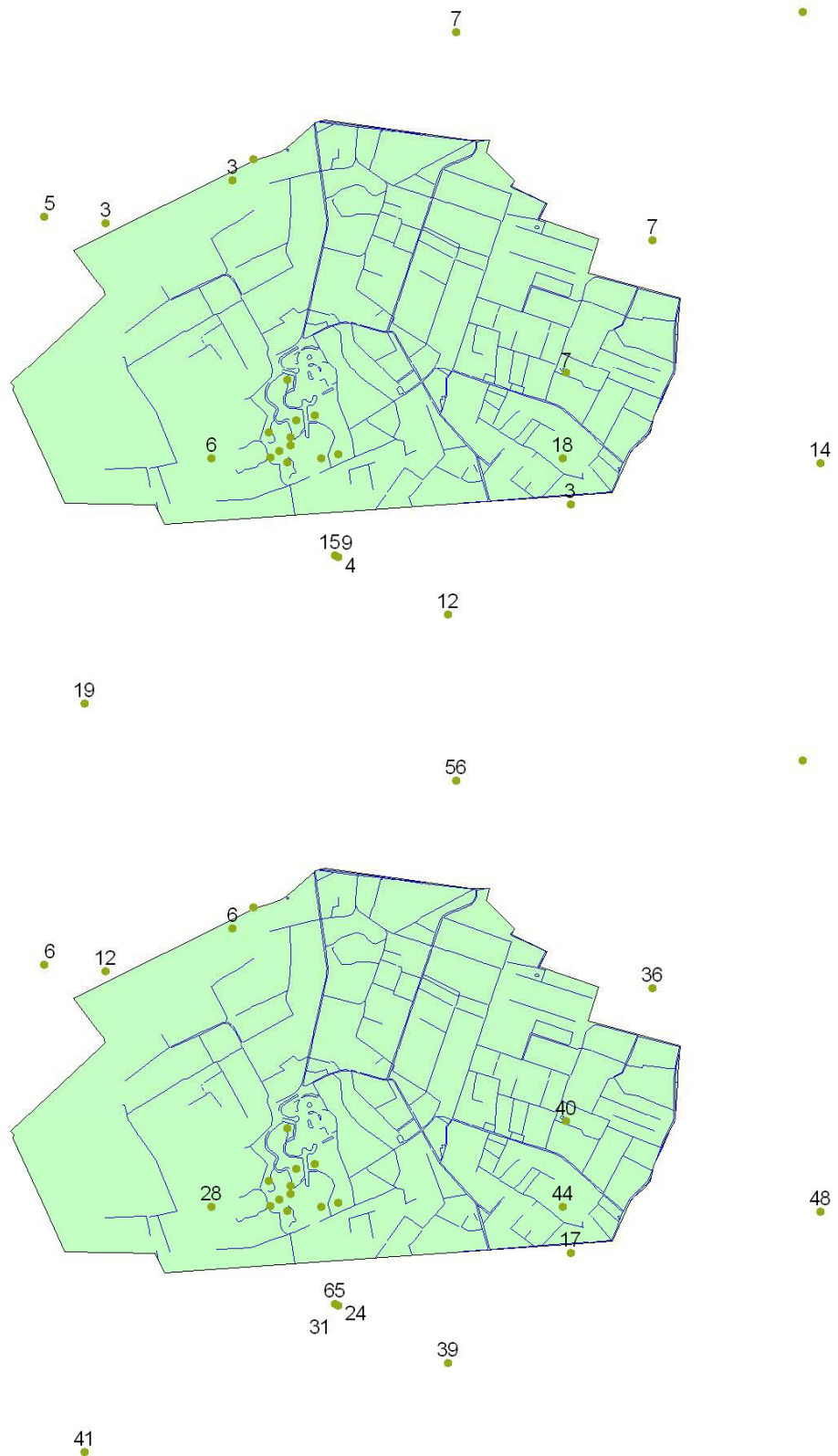
Bijlage 1 Analyses bodemmonsters omgeving “De Wildenborch”

Locatie	laag	Diepte	pH	Vocht	Gloeiverlies	Org. stof	CaCO ₃
1a	Bodem	0-5	6,8	2,02	6,1	5,6	0,7
1b	Bodem	10-20	6,9	1,28	5,4	5,1	1,7
1c	Talud	0-20	6,2	1,04	5,4	5	0,1
3a	Bodem	0-20	7,5	1,07	3,6	3,1	2,2
3b	Bodem	0-20	7,3	2,94	8,6	7,9	1,7
4	Bodem		6	2,92	10,1	9,5	0,2
Locatie	Lutum	Afslibbaar	Tot, zand	0-2 µm	2-16 µm	16-50 µm	50-105 µm
1	0,7	9,8	83,9	8,2	2,4	19,5	32,3
1	4,7	5,4	87,8	5,1	0,7	9,9	33,5
1	5,7	8,2	86,7	6,1	2,7	22,4	26,6
2	7,4	9,7	85	7,8	2,4	16,9	30,2
3	10,5	16,5	73,9	11,6	6,7	31,9	25,3
4	8,1	11,8	78,5	8,9	4,2	17,2	25,8
Locatie	105-150 µm	150-210 µm	210-300 µm	300-2000 µm			
1	19,8	12,5	3,6	1,7			
1	21,8	17,6	7,1	4,3			
1	18,6	14,4	5,2	4			
2	16,7	14,9	5,8	5,3			
3	12	8	2,9	1,6			
4	17,6	18,2	6,3	1,8			

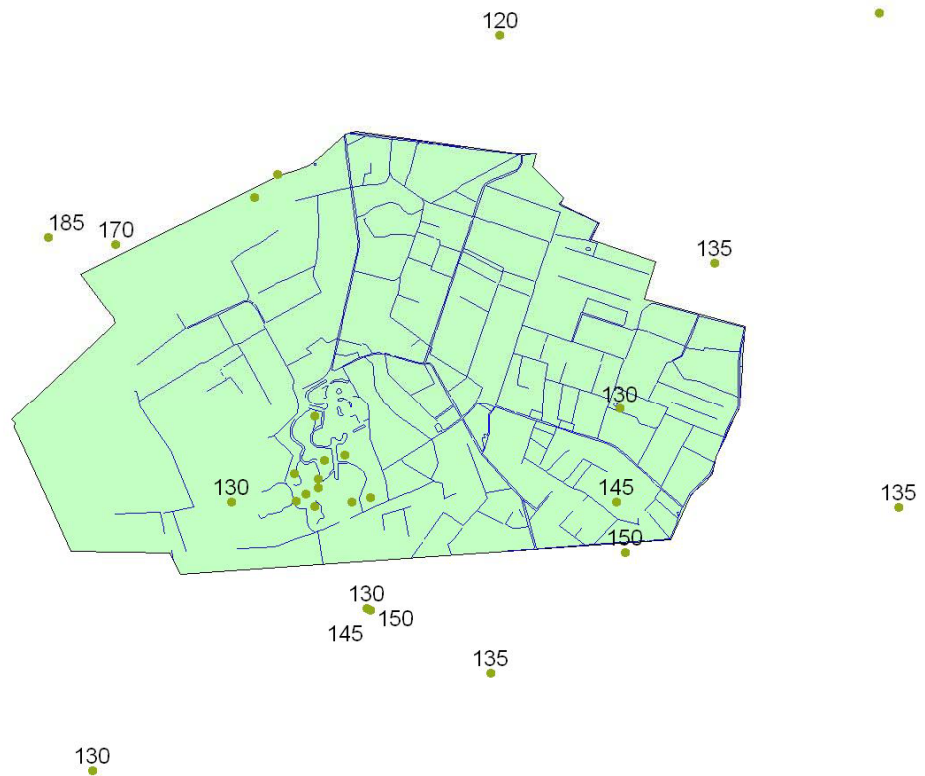
Bijlage 2 Locaties en monsterbeschrijvingen uit het BIS



Locaties en percentages organische stof van bovenste bodembodemhorizont



Lutum en leempercentages van bovenste bodemhorizont



M50-cijfer van bovenste bodemhorizont

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34A-19	AO	zEZ23-VIII	1Aap	692	0-19	4.3	6	14	160	692	226150	462875	HAM	1967
			1Aa1	692	19-37	3.1	6	15	160	692				
			1Aa2	692	37-55	3.6	5	12.5	155	692				
			1Aa3	692	55-95	1	4.5	13.5	135	692				
			1Bheb	631	95-110	1	5	13	135	631				
			1BCeb1	631	110-145	0.3	4	9.5	140	631				
			1BCeb2	631	145-155	0	3.5	9	130	631				
34C-1	GR	kpZg23-II	1Apg	340	0-20	10.7	8	26	150*	340	227610	461850	KRA	1958
			2Cg1	340	20-30	1.1	14	40	105	340				
			3Cg	410	40-70	0.3	6	23.5	100	410				
34C-10	BO	Hd21-VIII	1Ah	411	0-5	6.6	3	5.9	190*	411	222875	460875	KRA	1964
			1Eu	411	5-10	1.3	4.5	7	190*	411				
			1Bhs1	411	10-17	14.3	4.5	7	190*	411				
			1Bhs2	411	17-35	2.6	4	7.5	190*	411				
			1BCy	411	35-65	0.9	3	7.5	190*	411				
			1Cu	411	65-100	0.3	3.5	10.5	175*	411				
34C-11	GR	fpRn89p-II	1Apg	340	0-15	13.2	12	38.5	135	340	224150	458300	KRA	1964
			1Cg	340	15-45	2.3	27	70.5	115	340				
			3Cgr	340	45-65	1.4	17	36.5	155	340				
			3Cr	412	65-80	1	9	27.8	145	412				
			4Cr	410	80-120	1.3	6	16.5	135	410				
34C-12	GR	pRn59p-II	1Apg	340	0-20	11.4	15	64.5	130	340	223480	458650	KRA	1964
			1ACg	340	20-45	6.5	11	51.5	120	340				
			2Cgr1	412	45-70	1	3	9.6	160	412				
			2Cr	410	90-120	1.5	5	20.2	135	410				

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-13	GR	fRn62Cp-III	1Apg	340	0-15	5.7	9	31	145	340	223490	458645	KRA	1964
			1Cg1	340	15-50	1.4	9	28	160	340				
			1Cg2	412	50-75	0.4	4	12.3	150	412				
			1Cr	410	90-120	0.6	4.5	26	120	410				
34C-14	GR	fpZg23-III	1Apg	410	0-25	3.7	3.5	23.5	150	410	223500	458640	KRA	1964
			1Cg1	410	25-45	1	4	14.3	145	410				
			1Cgr	410	95-115	0.3	2.5	6.5	135	410				
34C-15	BO	Y23-VIII	1Ah	631	0-5	6.4	4.5*	14*	230*	631	226250	461870	KRA	1964
			1Bws	631	5-30	0.8	3.5	19	190*	631				
			1BCy	631	30-50	0.7	3	15.4	180*	631				
			1Cy	631	50-100	0.2	1.5	4.8	155	631				
34C-16	BO	gY30-VIII	1Ah	631	0-8	9.1	8	17	300*	631	226190	462065	HAM	1965
			1Bws	631	8-25	1.1	7	15	300*	631				
			1BCw	631	25-45	0.2	5	9.5	300*	631				
			1BCy	631	45-100	0	5	8	300*	631				
34C-17	BO	Hd30-VIII	1Eu	631	0-10	1.5	4	12.5	300*	631	226600	462155	HAM	1965
			1Bhs1	631	10-14	10.3	8	16.5	300*	631				
			1Bhs2	631	14-16	1.3	6	14	300*	631				
			1Bhs3	631	16-30	0.9	5	7.5	400*	631				
34C-17	BO	Hd30-VIII	1BCy	631	30-60	0.2	6	7.6	400*	631	226600	462155	HAM	1965
			1Cy	631	60-100	0	3.5	8	400*	631				
34C-18	GR	pLn5-III	1Ah1	422	0-10	5.9	7	55.5	120	422	224200	461750	HAM	1965

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-2	WD	Y21-VIII	1Ah2	422	10-18	3.2	8	50.5	100	422	228160	461590	KRA	1960
			1ACu	412	18-30	1.1	8	47	95	412				
			1Cu1	422	30-40	0.1	9	55.5	95	422				
			1Cu2	422	40-55	0.1	9	60	105	422				
			2Cu	410	55-100	0	5	8.3	145	410				
			2Cr	410	100-120	0	7	14.5	130	410				
			1Ah	440	0-5	4.4	2.5	7	190*	440				
			1Bws	440	30-60	1.1	1.5	6.5	190*	440				
			1Cu1	440	60-100	0.4	1.5	4.5	190*	440				
			1Cu2	440	100-120	0.4	3.5	7	190*	440				
34C-23	BO	zEZ23-VII	1Aap	692	0-25	6.1	6	28	130	692	222750	459225	HAM	1965
			1Aa	692	25-67	5.8	6	35.5	135	692				
			1Bheb	412	67-76	2.4	7	41	120	412				
			1B/Cb	412	76-90	4.2	7	38	110	412				
			1Cg1	412	90-104	1.2	6	27	130	412				
			1Cg2	412	104-120	0.2	4.5	16	140	412				
34C-24	GR	fpRn59p-II	1Apg	340	0-17	8.5	19	40.5	130	340	222000	457775	HAM	1965
			1Cg1	340	17-33	4.5	21	48	140	340				
			1Cg2	340	33-42	4	13	27	185	340				
			2Cg	412	42-53	0.1	6	9.5	200	412				
			2Cgr	412	53-65	0.1	6	15.5	140	412				
34C-25	GR	pZg23-III	1Apg2	410	6-18	2.7	7	36	135	410	225360	460520	HAM	1965
			1Cg1	412	18-47	0.1	5	32	125	412				
			1Cg2	412	47-90	0.2	5	11.2	140	412				

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-26	GR	fpRn59p-III	1Ahg2	340	5-23	5.3	7	40	130	340	224850	459730	HAM	1965
			1Cg	340	23-46	0.7	15	53.5	130	340				
			2Cg1	412	46-58	0	3	3.8	150	412				
			2Cg2	412	58-81	0	4	18.5	145	412				
			2Cgr	412	81-110	0.1	4.5	10	140	412				
			2Cr1	410	110-160	0.6	6	15.5	140	410				
34C-27	GR	svWz-II	2Ap	110	8-28	22.6	14	48	135	110	226355	459195	HAM	1965
			2Ah	110	28-33	18.1	15	40	130	110				
			3Cg	422	33-45	1.8	8	48	115	422				
			4Cgr	412	45-60	0.4	4.5	4.7	150	412				
			4Cr1	412	60-67	0.2	4	5	175	412				
			4Cr2	412	67-150	0.3	5	10.5	135	412				
34C-28	BO	Hd21-VIII	1Ah	411	0-3	4.7	4.5	6	185	411	221760	460660	HAM	1965
			1Eu	411	3-7	2	3.5	6	180	411				
			1Bhs1	411	7-14	14.7	3	6	185	411				
			1Bhs2	411	14-20	1.9	4	8.5	185	411				
			1Bhs3	411	20-32	1.3	3.5	5.4	180	411				
			1BCe1	411	32-46	0.5	2.5	3.7	175	411				
34C-28	BO	Hd21-VIII	1BCe2	411	46-70	0.2	3.5	4.3	180	411	221760	460660	HAM	1965
			1Cu	411	70-100	0.1	4	6.5	155	411				
34C-30	GR	fkZn21-III	1Ahg	340	0-10	8.7	18	44	145	340	224830	459225	HAM	1967
			1Cg	340	10-23	5.2	21	47	175	340				
			2Cg1	412	23-36	0.2	5	14.5	135	412				
			2Cg2	412	36-65	0	7	10.5	115	412				
			2Cgr	412	65-110	0	6	8.5	130	412				

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-32	GR	Hn23-III	1Ah	410	0-8	6.2	2.6	16.5	150	410	224875	458950	HAM	1974
			1Eu	410	8-12	3.1	1.9	17.5	145	410				
			1Bhe1	412	12-18	4.4	3.2	22.9	140	412				
			1Bhe2	412	18-26	2.6	1.8	11.1	145	412				
			1BCe1	412	26-39	1.5	1.9	6.3	130	412				
			1BCe2	412	39-56	0.7	2	6.2	130	412				
			1Cgr	412	56-85	0.5	3	12.3	120	412				
			1Cr	412	85-100	0.3	3.7	9.4	130	412				
34C-34	GO	Hd21-VII	1Ap	411	0-19	5.3	3.1	12.3	170	411	222125	460620	HAM	1975
			1Eu	411	19-28	5.2	2.8	12.6	160	411				
			1Bhs	411	28-41	3.2	3.3	11.8	165	411				
			1BCs	411	41-50	1.3	2.6	7.8	165	411				
			1BCy	411	50-60	0.8	2.3	6.2	170	411				
			1Cu1	411	60-75	0.5	2.3	8.8	155	411				
			1Cu2	411	75-100	0.3	2.3	6.2	145	411				
			1Cu3	410	100-120	0.3	3.2	20	160	410				
34C-35	GR	Hn21-VI	1Ap	410	0-28	4.6	2.4	16.8	150	410	228660	459240	STF	1982
			1Bhe	410	28-50	3*		11*	165*	410				
			1Bhe	410	28-50	4	2	12.3	155	410				
			1Cg1	410	60-95	0.6	2	9.5	140	410				
			1Cg1	410	60-95	*		9*	145*	410				
34C-58	BN	pZn23-F-Vb	2A/Bgp	411	0-40	3.1		22*	155* 17	411	226000	455000	MEK	1990
34C-59	BN	zHd21-VIII	1Cu	450	0-30	3.8	2*	4*	170*	450	223000	461000	BOO	1990

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-60	BL	pZg23-V	1F 2Ah	171 340	-12 0-30	80* 3*		36*	28 130*	171 340	223090	459380	MEK	1993
34C-61	BL	kpZg23-V	1H 2Ah	171 340	-2 0-15	80* 2*	6*	35*	130*	171 340	223150	459270	MEK	1993
34C-62	BL	pZn23-VI	1H 2Ah	171 411	-3 0-25	80* 4*		18*	140*	171 411	223200	459200	MEK	1993
34C-63	BL	Hn23-F-VI	1Hh 2A/B/Ep	171 -8412	-5 0-35	80* 4*		20*	140*	171 412	223500	459250	MEK	1993
34C-64	BL	pZg23-V	2Aan	692	0-30	5*		20*	145*	692	223360	459480	MEK	1993
34C-65	BL	zWp-VI	1Hr 1Aap	171 692	-4 0-20	80* 5*		16*	145*	171 692	223400	459225	MEK	1993
34C-66	BL	pZg23-H-V	1Hh 2Ah	171 693	-3 0-25	80* 4*		25*	145*	171 693	223200	459690	MEK	1993
34C-67	BL	pZg23-H-V	1F 2Ah	171 412	-3 0-10	90* 3*		20*	155*	171 412	223250	459450	MEK	1993
34C-68	BL	pZg23-VI	2Ah	412	0-10	4*		18*	130*	412	223220	459350	MEK	1993
34C-69	BL	pZg23-V	1F 2Ah	171 340	-3 0-15	80* 2*	6*	35*	130*	171 340	223220	459300	MEK	1993

Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34C-70	BL	pZg23-V	2Ah/F	412	0-10	4*		18*	130*	412	223100	459230	MEK	1993
34D-4	GR	pRn59p-IIIb	1Ahg1	340	0-6	12	25*	60*	130*	340	230425	460650	AAA	1955
			1Ahg2	340	6-16	7.8	22	41	135	340				
			1Cg1	340	16-24	1.8	21	37	125	340				
			1Cg2	340	24-50	1.1	20	48	130	340				
34D-43	AO	bEZ23-VIII	1Aap1	692	0-19	3.4	8	21.5	145	692	231110	459490	EBB	1965
			1Aap2	692	19-27	2.9	8	19.5	145	692				
			1Aa1	692	27-40	2.8	8	20.5	135	692				
			1Aa2	692	40-65	5	9	24	150	692				
			1Aa3	692	65-78	4.7	7	15.5	160	692				
			1Aa4	692	78-91	1.5	6	10.4	160	692				
			1Ah/Eub	410	91-108	2.8	5	11.2	160	410				
			1Bheb	410	108-118	2.5	7	15	160	410				
34D-48	AO	bEZ23-VIII	1Aap1	692	0-20	3.4	8	17.5	145	692	231215	459410	HAM	1967
			1Aap2	692	20-52	2.4	9	19.5	140	692				
			1Aa1	692	52-70	4.1	7	18	140	692				
			1Aa2	692	70-100	5.1	8	19	145	692				
			1Aa3	692	100-112	1.7	4.5	10.5	155	692				
			1Bheb	411	112-122	1.7	4.5	15	150	411				
			1Cu	411	122-140	0.2	3.5	4.7	165	411				
34D-7	GR	pRn59p-Vb	1Ahg1	340	0-10	13.9	25*	60*	130*	340	230605	460650	AAA	1955
			1Ahg2	340	18-10	7.2	21	45	145	340				
			1Ahg3	340	18-35	5.3	19	37	150	340				
			2Cg1	340	35-65	0.8	2	7	155*	340				

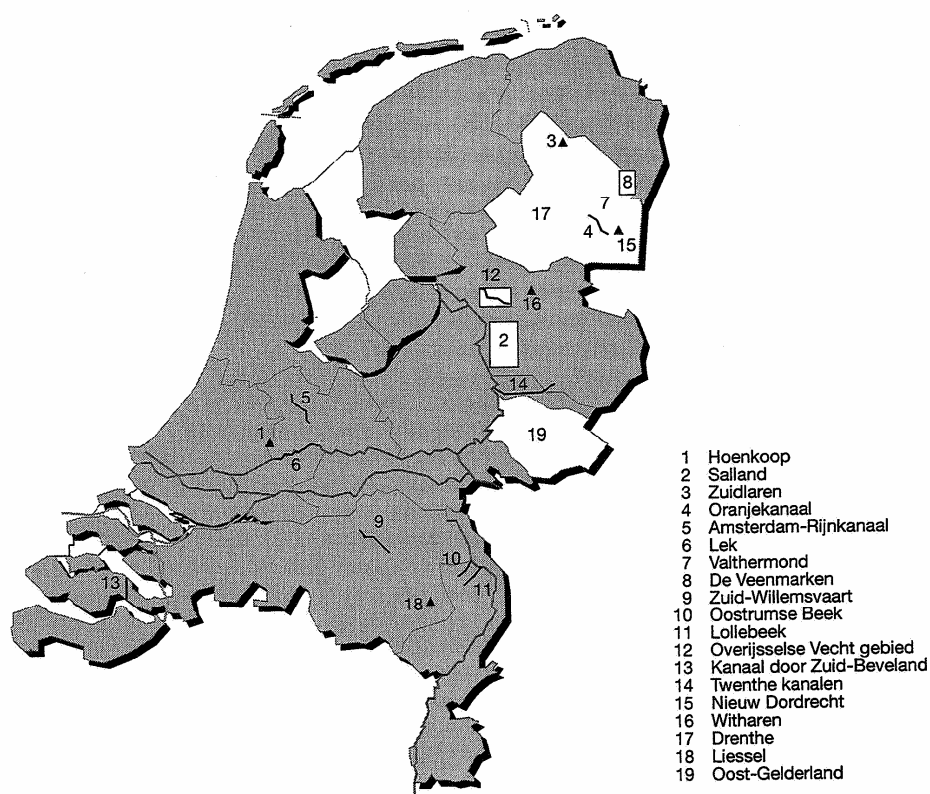
Centr.pr.n	geb.	Eenheid	Hor.c	for	Diepte	%Org	%Lut	%Lee	M50 C/N	for	X-coord.	Y-coord.	Opst	Jaar
34D-8	AO	bEZ21-VII	2Cg2	340	65-79	1.9	15	38	105	340	230520	460475	AAA	1955
			1Aap	692	0-27	4.4	5	14.5	160*	692				
			1Aa	692	27-52	2.7	4.5	12	160*	692				
			1A/Bb	411	52-61	2.4	2.5	9.5	160*	411				
			1Bhgb	411	61-103	2.1	2	3.9	170*	411				

Bijlage 3 Literatuuronderzoek intreeweestanden

In het verleden zijn meerdere veldstudies uitgevoerd met het doel om informatie te vergaren over de grootte van de intreeweestand in de veldsituatie. Om deze intreeweestand te meten zijn meerdere methoden toegepast. De resultaten van deze onderzoeken zijn meestal gebruikt als modelparameter voor modelonderzoek. De verslagen van de onderzoeksresultaten zijn veelal vastgelegd in literatuur die niet gemakkelijk toegankelijk is.

Door Jousma en Massop (1996) is getracht zoveel mogelijk literatuur mbt veldstudies te verzamelen. Naar alle waarschijnlijkheid is deze inventarisatie niet volledig, het geeft echter wel een beeld mbt de gemeten waarden en de landelijke spreiding van het onderzoek. Bij de analyse van de onderzoeksresultaten is o.a. gekeken naar de meetmethode, grootte van de waterloop, materiaal ondergrond (zand/veen) en stromingssituatie (drainage/infiltratie).

In onderstaande kaart (figuur 1) is de ligging van de gebieden, waar de veldstudies zijn uitgevoerd weergegeven, in tabel 1 zijn de geïnventariseerde onderzoeken samengevat.



Figuur 1 Locaties waar veldstudies zijn uitgevoerd naar intreeweestanden

Het valt direct op dat de meeste studies in het zandgebied zijn uitgevoerd. Een mogelijke oorzaak is dat deze weerstand in zandgebieden een belangrijk onderdeel is

van de totale drainage/infiltratie weerstand, terwijl in kleigebieden ook de horizontale weerstand een belangrijke rol speelt bij de totale drainageweerstand. Bovendien worden waterlopen in bijv. het veengebied regelmatig gebaggerd, waardoor de eventuele intreeweerstand verandert. In kleigebieden geldt veelal dat de ontwatering via buisdrainage plaatsvindt waardoor de kennis over de intreeweerstand een minder belangrijke rol speelt. In tabel 1 is een overzicht gegeven van het geïnventariseerde onderzoek.

Tabel 1 Overzicht onderzoeken mbt intreeweerstanden

Nummer	Locatie	Instantie	Auteur(s)	Titel
1969-1	Hoenkoop	ICW	J.Wesseling	Enkele resultaten van het hydrologisch onderzoek op het ontwateringsobject Hoenkoop.
1972-1	Salland	ICW	H. Fonck	Een onderzoek naar de grootte van de weerstanden in de slootbodembij infiltratie vanuit een sloot.
1973-1	Salland	ICW	H. Fonck	Een onderzoek naar de grootte van de infiltratie vanuit watervoerende leidingen in het Waterschap Salland.
1973-2	Zuidlaren	ICW	R.A.Feddes <i>et al</i>	Infiltratieproefveld 'De Groeve'.
1974-1	Oranjekanaal	ICW	B vd Weerd	Onderzoek naar de wegzijging in het Derde pand van het Oranjekanaal.
1980-1	A-R kanaal, Lek, Leidsche Rijn	RID	G.J.Hey <i>et al</i>	De hydrologische interactie tussen de grotere waterlopen en het grondwater in West-Utrecht.
1982-1	Valthermond & Zuidlaren	HBCS Veip	A.Bartels <i>et al</i>	Drainage- en infiltratieweerstanden in het veenkoloniale gebied. (Onderzoek in Valthermond en 'De Groeve', Zuidlaren).
1982-2	Valthermond, De Veenmarken	ICW	T v. Keulen	Bepaling van geohydrologische grootheden uit waterbalansen en grondwaterstanden van het wateraanvoer gebied 'De Monden'.
1983-1	Z-Willemsvaart, Den Dungen-Erp	ICW	K.E.Wit	Berekening van de kanaalweerstand van de Zuid Willemsvaart in het traject Den Dungen - Erp.
1985-1	Oostrumse Beek, (L)	KIWA	H.J.Vinkers	Bepaling van de slootweerstand van de Oostrumse Beek tussen de stuwen 09 en 010.
1985-2	Lollebeek, (L)	KIWA	H.J.Vinkers	Bepaling van de slootweerstand van de Lollebeek tussen de stuwen L10 en L9.
1985-3	Overijsselse Vecht gebied	RIVM	K.G.Lamsvelt	Bepaling van de bodemweerstand in en onder watergangen door middel van infiltratie proeven in het gebied van de Overijsselse Vecht - West.
1986-1	Waterschap De Veenmarken	ICW	P.J.T.van Bakel	Planning , Design and Operation of Surface Water Management Systems.
1987-1	Kanaal door Zuid-Beveland	DBW/ RIZA	B.P.C. Steenkamp	Inschatting van de Kwelverandering langs het Kanaal door Zuid-Beveland als gevolg van verbeteringswerken.
1987-2	Twenthekanalen, Eefde - Lochem	ICW	K.E.Wit <i>et al</i>	Hydrologische en bodemfysische parameters in de omgeving van het hoofdkanaal van Twenthekanalen (traject Eefde - Lochem).

Nummer	Locatie	Instantie	Auteur(s)	Titel
1988-1	Vathermond, De Veenmarken	HBCS	HBCS Velp	Drainage - infiltratie proefveld Vathermond; Veldonderzoek betreffende drainage-omhullingsmaterialen in de Veenkolonien.
1988-2	Waterschap Salland	WMO	onbekend	Infiltratie proeven Waterschap Salland
1989-1	Nieuw Dordrecht	SC-DLO	K.E.Wit <i>et al</i>	Onderzoek naar de effecten van beheersmaatregelen op de conservering van een Neolithische veenweg bij Nieuw-Dordrecht.
1989-2	Witharen	KIWA	B.A.i.Meeuwissen <i>et al</i>	Onderzoek naar de waarden van belangrijke geo-hydrologische parameters in het gebied Witharen
1991-1	Provincie Drenthe	SC-DLO	K.E.Wit <i>et al</i>	Relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de Provincie Drenthe.
1992-1	Liessel, Waterschap Aa, (NB)	SC-DLO	J.G.te Beest <i>et al</i>	Gevolgen van maatregelen om hydrologische effecten van een ontgroning te Liessel te compenseren.
1994-1	Oost-Gelderland	SC-DLO	H.Th.L.Massop <i>et al</i>	Hydrologisch onderzoek naar de drainageweerstanden van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost Gelderland

Deze onderzoeken zijn uitgewerkt in een aantal tabellen (tabel 5 t/m 10) opgesplitst naar slootklasse. Hierbij is een indeling gehanteerd ontleend aan Ernst, naar diepte gehanteerd (tabel 2).

Tabel 2 Klassificatie van waterlopen

Klasse	Diepte in m tov mv		Omschrijving waterloop	
	min	max	Vlak gebied	Hellend gebied
1	0,40	0,65	kleine sloot, greppel	kleine sloot, greppel
2	0,65	1,05	middelgrote sloot	kleine beek, middelgrote sloot
3	1,05	1,75	grote sloot	kleine beek, grote sloot
4	1,75	2,70	wijk, vaart, etc.	middelgrote beek (b.v. Leerinkbeek)
5	2,70	4,00	middelgroot kanaal (b.v. Oranje kanaal)	kleine rivier (b.v. Berkel)
6	4,00	8,00	grote rivier (b.v. Rijn, IJssel) en groot kanaal (b.v. A.R.Kanaal)	grote rivier (b.v. Rijn, IJssel) en groot kanaal (b.v. A.R.Kanaal)

De beste schatting voor de intreeweerstand in het zandgebied is 1 d, waarbij voor drainerende beken een lagere waarde van 0,5 dagen kan worden gehanteerd. Uit deze informatie is onderstaande kennistabel afgeleid voor waterlopen uit de Top10-vector in het zandgebied.

Tabel 3 Kennistabel mbt intreeweerstanden

Ondergrond	Klasse waterloop	Intreeweerstand (d)
Zand	Tertiair	1
	Secundair	1
	Primair	1
	Beken	0.5
	Kanalen infiltratie	1 - 200

Voor klei en veengronden kan aansluiting worden gezocht bij de studie Zuid-Hollandsche Eilanden en Waarden (Werkgroep Zuid-Holland, 1987, tabel 11). Voor een ruimtelijk beeld van de intreeweestanden kan deze bijvoorbeeld worden gekoppeld aan de kaart met bodemfysische eenheden. Omdat uit onderzoek blijkt dat de intreeweestand voor beken lager is dan voor de overige waterlopen in het zandgebied is aan de tabel het hydrotipe Singraven toegevoegd. Singraven wordt onderscheiden in organisch en mineraal afzettingen. Verder is voor zeer zware ondergronden een hogere intreeweestand toegepast. Voor infiltrerende grote waterlopen worden hogere waarden gevonden.

Tabel 4 Intreeweestand per bodemfysische eenheid

Bodemfysische eenheid of hydrotipe	Intreeweestand (dagen)
1-5, 7-14, 18-20,22,23 (zand, zandondergrond)	1
15,16,21 (klei, zavel, leem)	2
6,17 Ongerijpt klei of zware tussenklaag	3
Singraven	0,5

Tabellen met intreeweestanden per klasse van waterlopen

Tabel 5 Intreeweestand greppels en kleine sloten – klasse 1 en 2

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)	Opmerking
				normaal	proef		
1994-1	Oost Gelderland-Meerderere proefgebieden	2	zand	Drainage/droog	Drainage/droog	0,2-2,4	Gem 0,7
	Idem	1	zand	Drainage/droog	Drainage/droog	0,2-1,4	Gem 0,7

Tabel 6 Intreeweestand van grote sloten en tochten – klasse 3

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef	
1972-2	Salland	3/4	zand	infiltratie	infiltratie	0,9 - 3,2
1985-3	Overijsselsche Vecht					
	-K. Kloosterweg	3	zand	drainage	infiltratie	1,6 - 0,3
	-Stadsweg	3	zand	drainage	infiltratie	0,9 - 0,5
	-Schapendijk	3	zand	infiltratie	infiltratie	3,5 - 0,3
	-Weemerveldweg	3	zand	infiltratie	infiltratie	7 - 2,7
1991-1	Drenthe					
	-infiltratieproeven	3	zand	Infiltr+dr	infiltratie	2,3 - 7,5
	-metingen in raaien	3	zand	Infiltr+dr	Infiltr+dr	0,6 - 4,7
1992-1	Liessel	3	zand	infiltratie	infiltratie	0,2 - 0,7 1,8
1994-1	Oost-Gelderland	3	zand	drainage	drainage	0,2 - 2,1

Tabel 7 Intreeweestand Oostromse Beek en Lollebeek – klasse 3 en 4

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef	
1985-1	Oostrumse Beek	3/4	lemig zand	drainage	drainage	nihil
1985-2	Lollebeek	3	zand	drainage	infiltratie	0,05

Tabel 8 Intreeweestand van veenkoloniale nijken – klasse 4

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef	
1986-1	Waterschap Veenmarken	3/4	zand	infiltratie	infiltratie	0,9 - 3,2
1989-1	Nieuw Dordrecht	3?	zand	infiltratie	infiltratie	0,4

Tabel 9 Intreeweerstand van grote kanalen – klasse 5 en 6

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef	
1974-1	Oranjepand, 3e pand	5	Zand	Infiltratie	Infiltratie	400-1000
1980-1	Amsterdam-Rijn kanaal traject Utrecht - Breukelen	6	Zand/veen	Infiltratie	Infiltratie	10-250
1983-1	Zuid-Willemsvaart, traject Den Dungen - Erp	5	Zand	Infiltratie	Infiltratie	15-40 0,7 (0-34)
1985-4	Twenthekanaal	6	Zand	Infiltratie	Infiltratie	1-30
1987-2	Zijkanaal	5	Zand	Infiltratie	Infiltratie	1-200
1987-1	Kanaal door Z- Beveland	5	Zand?	Infiltratie	Infiltratie	30

Tabel 10 Intreeweerstand van grote rivieren – klasse 6

Jaar	Onderzoek	Klasse waterloop	Bodem	Hydrologische condities		Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef	
1980-1	Lek, traject Vreeswijk- Schoonhoven	6	Zand	Infiltratie	Infiltratie	70-150

Tabel 11 Kennistabel slootweerstanden en doorlaatvermogen van verschillende ondergronden (Werkgroep Zuid-Holland, 1987)

Type Ondergrond	Slootweerstand (d. m-1)	Doorlaatvermogen
Zand	1	9,3
Zavel	2	7,4
veen	2	3,5
Gerijpte klei	3	5,5
Ongerijpte klei	3	2,5