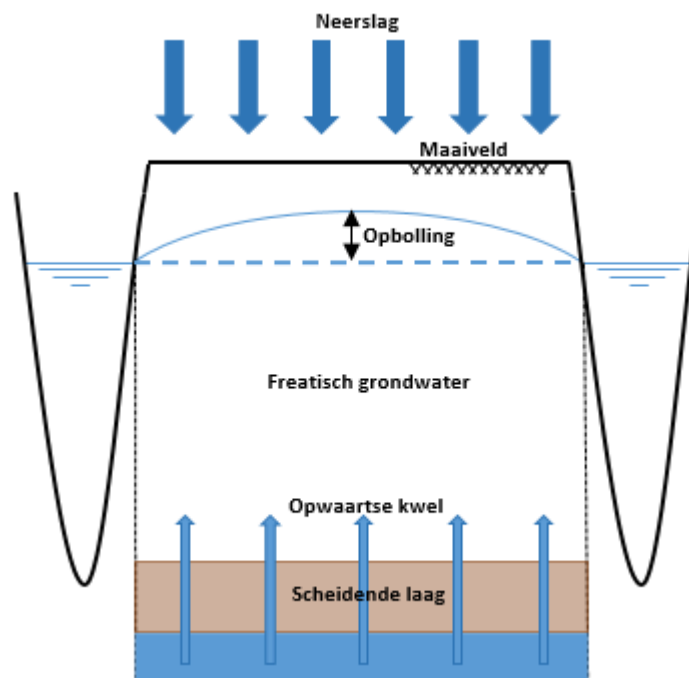


7/7/2015

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

*Onderzoek naar de nauwkeurigheid van de
berekende grondwaterstand in het wegcunet*



Definitief verslag

Martijn Asschert

Colofon

Auteur: M.C. Asschert

Studentnummer: S1367846

Opleiding: Universiteit Twente
Bachelor Civiele Techniek

Afstudeercommissie:	Ir. R.P. van Denderen	Universiteit Twente	Begeleider
	Ir. M. van Vierssen	Aveco de Bondt	Extern Begeleider

Aveco de Bondt: Ingenieursbureau
Bezoekadres:
Reggesingel 2
7460 AE Rijssen
Postadres:
Postbus 202
1111 AA Rijssen
Tel: +31 (0)548 51 52 00

Universiteit Twente: Universiteit
Bezoekadres:
Drienerlolaan 5
7522 NB Enschede
Postadres:
Postbus 217
7500 AE Enschede
Tel: +31 (0)53 489 9111

Verslagstatus: Definitief verslag

Documentgeschiedenis:	<i>Versie</i>	<i>Datum</i>	<i>Verandering</i>
	0.0	21-04-2015	Voorverslag ingediend
	1.0	04-06-2015	Tussenrapportage ingediend
	2.0	19-06-2015	Conceptverslag ingediend
	3.0	07-07-2015	Definitief verslag ingediend

Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van het Bacheloronderzoek van Martijn Asschert naar de opbolling van grondwater onder de wegverharding. Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Het uitvoeren van het onderzoek en schrijven van het scriptie heeft plaatsgevonden van april 2015 tot en met juni 2015.

Deze scriptie is geschreven in opdracht van mijn stagebedrijf Aveco de Bondt. Samen met mijn bedrijfsbegeleider, Maarten van Vierssen, is een onderzoeksvraag bedacht. Het was een uitdagende onderzoeksvraag, waar wij beiden enthousiast over waren. Tijdens het vinden van een antwoord op deze vraag zijn verscheidene theoretische vraagstukken en praktijkproblemen voorbij gekomen. Om deze vraagstukken en problemen op te lossen heb ik mij gedurende de onderzoeksstage vooral bezig gehouden met literatuuronderzoek, formuleberekeningen en veldmetingen. Door deze verscheidenheid aan onderzoeksmethoden heb ik veel kennis opgedaan in het vakgebied en ik hoop deze kennis dan ook in de toekomst in mijn carrière toe te kunnen passen.

Het onderzoek komt voort uit de resultaten van een voorgaand onderzoek van Johan Damveld. De resultaten en de vragen die hieruit naar voren zijn gekomen hebben mij gemotiveerd om te starten met dit onderzoek. Uit het onderzoek is een resultaat naar voren gekomen, waarover ik zeer tevreden ben. Daarnaast heb ik mijn tijd werkzaam bij Aveco de Bondt als een zeer plezierige en leerzame periode ervaren.

Bij dezen wil ik graag mijn bedrijfsbegeleider Maarten van Vierssen en mijn Universiteitsbegeleider Pepijn van Denderen bedanken voor de begeleiding en ondersteuning gedurende mijn onderzoek. Daarnaast wil ik dhr. J. Meinders en dhr. G. Winters bedanken voor de ondersteuning met de peilbuizen en het meedenken in de resultaten van het onderzoek betreffende het grondwater. Ik wil Johan Damveld graag bedanken voor de hulp bij alle zaken betreffende de dataverwerking van de peilbuizen, de Ruimte & Milieu afdeling in Rijssen bedanken voor de hulp bij het opzetten en plaatsen van de peilbuizen en dhr. J. Van de Gevel en dhr. M. Wennink wil ik bedanken voor het beantwoorden van de vragen betreffende het wegontwerp.

Tot slot wil ik de Gemeente Apeldoorn bedanken voor het verlenen van de toestemming voor de peilbuisplaatsing, het Waterschap Vallei en Veluwe voor het verlenen van de neerslagdata en TrafficService Nederland voor het regelen van de benodigde wegafzetting. Uiteraard wil ik ook alle andere collega's, waar ik mee in contact gekomen ben bij Aveco de Bondt, bedanken voor de fijne samenwerking en het leveren van een goede werksfeer.

Dan rest mij verder niets meer dan u veel leesplezier toe te wensen.

Martijn Asschert

Enschede, 19 juni 2015

Samenvatting

In de winter is er een grote kans op vorstschade. Doordat water in de poriën van het wegontwerp blijft hangen en uitzet bij bevriezing kan de weg in het ergste geval bezwijken. Om vorstschade te voorkomen, wordt gebruik gemaakt van een droogleggingseis berekend met de formule van Hooghoudt. Volgens Damveld (2013) geeft deze formule in één van de drie gevallen een onjuiste benadering voor de droogleggingseis, wat vermoedelijk veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van kwel. Aan de hand van deze informatie is in dit onderzoek bepaald of de formule van Wesseling een nauwkeurigere representatie van de werkelijke opbolling geeft. In dat geval is wellicht een besparing in de droogleggingseis mogelijk en kan ook in het zand voor ophoging, dus de kosten, bespaard worden. De doelstelling is dan ook om te bepalen of de formule van Wesseling een nauwkeurigere weergave van de grondwaterstand in het wegcunet geeft dan de formule van Hooghoudt, waarbij vervolgens op basis van de stabiliteit bekeken wordt of er winst te behalen valt in het dunner maken van het in de fundering gelegen zandpakket van het wegcunet.

Uit het onderzoek blijkt dat kwel een invloed uitoefent op de freatische grondwaterstand en dus ook op de werkelijke waarde van de droogleggingseis. Echter houdt Hooghoudt (1940) in tegenstelling tot Wesseling (1984) geen rekening met deze kwel. Hooghoudt (1940) benadert daarentegen de neerslag weer beter dan Wesseling (1984), waardoor geconcludeerd wordt dat Hooghoudt (1940) de aanvoer van bovenaf correct benadert en Wesseling (1984) correct rekening houdt met de kwel. Daarbij komt, dat de in het onderzoek gebruikte kwelaanvulling in de formule van Hooghoudt geen compensatie biedt voor het niet meenemen van de kwel door Hooghoudt (1940). Er zal daarom nog gekeken moeten worden of er een verhouding te bepalen valt tussen de kwel en de neerslag, zodat de kwelaanvulling wellicht beter kan worden bepaald. Daarnaast is het interessant om een formule met een factor tijd te toetsen, aangezien Wesseling (1984) en Hooghoudt (1940) dit niet hebben.

Beide formules zijn ook gevoelig voor de doorlatendheid in het freatisch waterpakket. De gebruikte gemiddelde waarde voor de doorlatendheid in de formule van Wesseling levert dus wellicht een meetfout op en de opbouw van de bodem en het wegcunet kunnen een grote invloed uitoefenen op de opbolling van het grondwater. In vervolgonderzoek zal bij een toetsing aan veldmetingen professioneel bodemonderzoek gedaan moeten worden en is het interessant om de invloed van een verscheidenheid aan doorlatendheidscoëfficiënten in het freatische waterpakket te onderzoeken.

Voor de stabiliteit van het wegontwerp geldt, dat de vorstvrije zone de stabiliteit van het wegontwerp bepaald. Hierdoor is de droogleggingseis, qua stabiliteit, niet afhankelijk van de vorstvrije zone. Dit betekent, dat met een dunnere droogleggings-eis, een besparing mogelijk is als het wegontwerp boven de maaiveldhoogte uitkomt. Deze mogelijke besparing is dus locatie afhankelijk. Uit vervolgonderzoek moet blijken, wat het rendement van een dergelijke besparing en het exact aantal geschikte situaties, met een mogelijke besparing in de droogleggingseis, is.

Uit het onderzoek volgt de algemene conclusie dat de formule van Wesseling in een situatie met een grondwaterpeil vlak onder het maaiveld en een groot oppervlak aan wegverharding, die de aanvoer van boven minimaliseert, een betere benadering voor de droogleggingseis geeft dan de formule van Hooghoudt. Daarbij moet de grondwaterstand zich dicht onder het maaiveld bevinden. In een situatie met enkel neerslag benadert de formule van Hooghoudt de droogleggingseis beter en in een situatie met ongeveer evenveel kwel als neerslag zijn beide formules matig geschikt. In een vervolgonderzoek is wegens de niet volledig geschikte locatie van de veldmetingen nader praktijkonderzoek nodig op de locatie van de mislukte metingen te Apeldoorn voor een definitieve bevestiging van de geschiktheid van de formule van Wesseling in situaties met kwel. Daarnaast zal onderzoek gedaan moeten worden naar wellicht een nieuwe formule voor de berekening van de droogleggingseis in een situatie met ongeveer evenveel kwel als neerslag.

Inhoudsopgave

Figuren- en tabellenlijst.....	6
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond.....	8
1.2 Probleem- en doelstelling	10
1.3 Onderzoeksvragen.....	11
1.4 Hypothese	11
1.5 Methodiek	12
2 Achtergrond van Hooghoudt en Wesseling	13
2.1 Formule van Wesseling	13
2.2 Parameterbeschrijving formule van Wesseling.....	15
2.3 Formule van Hooghoudt.....	16
2.4 Parameterbeschrijving formule van Hooghoudt.....	18
3 Theoretische studie van Hooghoudt en Wesseling	20
3.1 Test case	20
3.2 Analyse met kwel- en neerslagsituaties	21
3.3 Parametergevoeligheidsanalyse	25
4 Toetsing aan veldmetingen	33
4.1 Eigen veldmetingen	33
4.2 Toetsing aan de veldmetingen met Damveld (2013)	36
5 Onderzoek aanpassing wegcunet.....	41
5.1 De eigenschappen van de wegconstructie.....	41
5.2 Toetsingsmethodes voor de weg(fundering)	46
5.3 Bepaling aanpassingslimiet wegcunet.....	49
6 Conclusie	51
7 Discussie	54
8 Aanbeveling.....	56
Bronvermelding.....	57
Bijlage A: Locatiebeschrijving	61
Bijlage B: Inmeet methode	68
Bijlage C: Toetsingsmethodes op locatie.....	73
Bijlage D: Resultaten veldmetingen middenberm	74

Figuren- en tabellenlijst

Figurenlijst

Figuur 1: Voorbeelden vorstschade aan het wegdek.....	8
Figuur 2: Visualisatie processen bij de opbolling van de grondwaterstand.....	8
Figuur 3: Voorbeeld van een wegcunet	10
Figuur 4: Schets situering opbolling formule van Wesseling inclusief kwel en neerslag	13
Figuur 5: Schets situering opbolling formule van Hooghoudt inclusief aanvoer van bovenaf	17
Figuur 6: Visualisatie radiale kwel met zijn equivalente diepte	19
Figuur 7: Visualisatie parameters natte omtrek.....	19
Figuur 8: Visualisering parameterkeuze standaardsituatie.....	20
Figuur 9: Invloed dike van het freatisch waterpakket (D)	26
Figuur 10: Invloed afstand tussen de sloten (L)	27
Figuur 11: Invloed waterpeil in de sloten (h_s)	27
Figuur 12: Invloed neerslag Wesseling en afvoer Hooghoudt (N en s)	28
Figuur 13: Invloed doorlatendheid boven slootwaterpeil (k_1)	28
Figuur 14: Invloed doorlatendheid onder slootwaterpeil (k_2)	29
Figuur 15: Invloed stijghoogte onder de scheidende laag (H)	30
Figuur 16: Invloed weerstand van de scheidende laag (c)	31
Figuur 17: Meetlocatie Kanaal Noord te Apeldoorn	34
Figuur 18: Locaties peilbuizen	34
Figuur 19: Meetopstelling peilbuizen.....	34
Figuur 20: Meetlocatie Damveld (2013) met exacte locaties peilbuizen.....	36
Figuur 21: Boormonsterprofiel ten hoogte van locatie 3 van Damveld (2013)	37
Figuur 22: Doorsnede-profiel bodem locatie Damveld (2013).....	38
Figuur 23: Resultaten peilbuizen locatie Damveld (2013)	38
Figuur 24: Principetekening opbouw van de wegconstructie.....	41
Figuur 25: Vorstschade aan het wegdek	42
Figuur 26: Aanbrengen van EPS-blokken	43
Figuur 27: Aanbrengen van schuimbeton	43
Figuur 28: Voorbeeld spoorvorming.	44
Figuur 29: Krachtenoverdracht in een ongebonden fundering	44
Figuur 30: Schematisatie van de opbouw van de wegverharding	45
Figuur 31: Belasting situatie in de wegconstructie	47
Figuur 32: Voorbeeldpagina OIA (V&W Asfalt, 2010)	48
Figuur 33: Wegontwerp met en zonder droogleggingseis	49
Figuur 34: Schets wegontwerp zonder optredende opbolling.....	50
Figuur 37: Visualisatie van de besparing inclusief wegontwerp	53
Figuur 36: Vergrote weergave van de besparing uit Figuur 35	53
Figuur 35: Visualisatie van de besparing exclusief wegontwerp.....	53
Figuur 38: Bovenaanzichten meetlocatie uit de meetmethode.....	61
Figuur 39: Vooraanzicht meetlocatie uit de meetmethode	61
Figuur 40: Woudhuizemark 100	62
Figuur 41: Oost Veluweweg/Kanaal Noord.....	62
Figuur 42: Brinkenweg 123.....	62
Figuur 43: Locatie en gegevens peilbuis.....	63

Figuur 44: Doorsnede ondergrond parallel met Oost Veluweweg	63
Figuur 45: Doorsnede ondergrond haaks op Oost Veluweweg	64
Figuur 46: Boormonsterprofiel op locatie peilbuis Waterschap	64
Figuur 47: Schematisatie peilbuisfilters en ondergrond	64
Figuur 48: Isohypsen rond de meetlocatie	65
Figuur 49: Bovenaanzicht schematisatie locatie Apeldoorns Kanaal	65
Figuur 50: Algemeen overzicht stijghoogten (2003-2013)	66
Figuur 51: Overzicht stijghoogten 2009 en 2010	66
Figuur 52: Overzicht stijghoogten 1/6/2009 - 15/9/2009	66
Figuur 53: Verkeersmaatregelen weg Kanaal Noord	67
Figuur 54: Situatie wegzijging (links); situatie kwel (rechts): opwaartse stroming	68
Figuur 55: Hoogtekaart locatie 3	69
Figuur 56: Meetopstelling	71
Figuur 57: Meetopstelling peilbuizen voor slootwatepeilmeting	71
Figuur 58: Overzicht locaties voor de waterpassing	72
Figuur 59: Voorbeeld waterpassingsinstrumenten	72

Tabellenlijst

Tabel 1: Overzichten parameterwaarden	20
Tabel 2: Situaties bij verandering in kwel en neerslag inclusief toepassing kwelaanvulling	22
Tabel 3: Situaties bij verandering in kwel en neerslag exclusief toepassing kwelaanvulling	23
Tabel 4: Parameterwaarden breedtes en dieptes locatie 1 en 3	37
Tabel 5: Parameterwaarden doorlatendheden en weerstanden locatie 1 en 3	37
Tabel 6: Meetgegevens voor bepaling specifieke opbolling	39
Tabel 7: Resultaten specifieke opbollingen formules en veldmetingen	40
Tabel 8: Overzicht voor de geschiktheid van de formules (+ = bruikbaar en – = onbruikbaar)	51
Tabel 9: Veldmetingen peilbuizen middenberm locatie 1 en 3	78

1 Inleiding

Elk jaar zie je of hoor je er wel van, vorstschade aan de weg. Er zijn verschillende oorzaken voor deze vorstschade. Eén van de oorzaken is dat de poriën van het asfalt nog water bevatten, het kwik onder nul daalt en het water uitzet bij bevriezing. Bij de dooi scheurt of verbrijzelt er asfalt en ontstaat langzamerhand een gat in de weg.



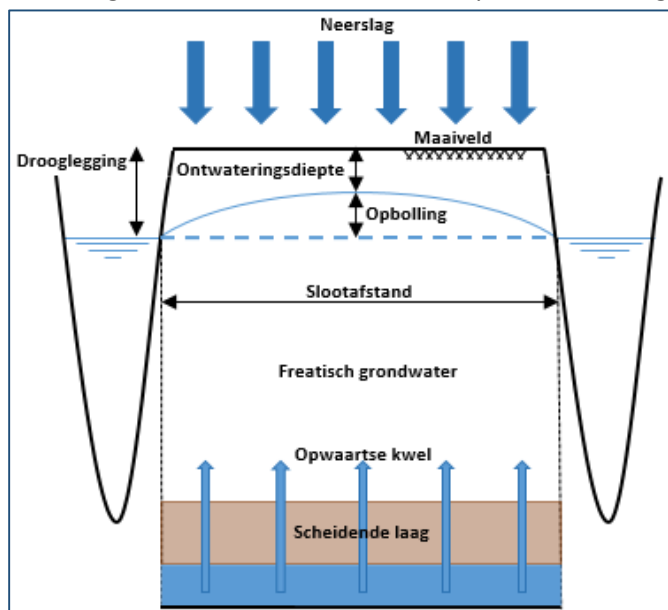
Figuur 1: Voorbeelden vorstschade aan het wegdek

Dit betreft een klein geval van vorstschade. Wanneer een langere periode van vorst plaatsvindt, bestaat er de mogelijkheid dat de vorst doordringt tot in het grondwater. Wanneer grondwater zich in de fundering van de weg bevindt, betekent dit dat er geen ruimte meer is in de poriën om bij uitzetting het water af te kunnen voeren. Als de fundering volledig verzadigd is bij vorst kan dit tot grote scheuren en instabiliteit van de weg leiden. Daarnaast kan de capillaire opstijging van het grondwater er nog voor zorgen dat onvoorziene grondwaterhoogtes ontstaan en zullen de problemen bij voortdurende vorst en dooi steeds groter worden. In Figuur 1 zijn twee veel voorkomende voorbeelden gegeven van deze vorstschade aan het wegdek.

1.1 Achtergrond

Bij het aanleggen van een weg moet er bepaald worden op welke hoogte het grondwaterpeil zich onder de weg zal gaan bevinden om de problemen uit Figuur 1 te voorkomen. Hiervoor wordt de zogenaamde opbolling onder de wegverharding berekend. Onder opbolling wordt het verloop van het grondwaterpeil onder de wegverharding bedoeld. In Figuur 2 is een visualisatie gegeven van het verloop van het grondwaterpeil in het geval van een aanwezige opbolling tussen twee sloten.

Daarnaast zijn in Figuur 2 de parameters aangegeven, die men tegen zal komen als een opbolling aanwezig is. Het maaiveld betreft de top van de ondergrond, de ontwateringsdiepte is de afstand



Figuur 2: Visualisatie processen bij de opbolling van de grondwaterstand

vanaf het maaiveld tot het maximale grondwaterpeil en tot slot betreft de drooglegging de afstand vanaf het maaiveld tot het waterpeil wat zich in de sloten naast de weg bevindt.

De fysische processen waarmee rekening gehouden wordt zijn de neerslag en de opwaartse kwel. Deze twee processen leveren het water, wat voor een verandering in grondwaterpeil kan zorgen. Onder neerslag verstaan we al het water dat vanuit de lucht op de oppervlakte van de aarde valt. Een ander woord hiervoor is hemelwater. (KNMI, Neerslag, 2015) Onder kwel verstaan we de hoeveelheid grondwater dat zich onder druk richting het oppervlak verplaatst. Deze kwel is

afhankelijk van het verschil in stijghoogte¹ onder de scheidende laag² en de freatische grondwaterstand³. Deze twee onderdelen zijn weergegeven in Figuur 2. Een stijghoogte wordt bepaald door de waterdruk die in de betreffende bodemlaag heerst. Wanneer onder de scheidende laag een grotere stijghoogte en dus waterdruk heerst als boven de scheidende laag, zal er grondwater door deze scheidende laag naar boven stromen. De weerstand van de scheidende laag oefent hierbij een effect uit op de snelheid van de grondwaterstroming door de scheidende laag richting het oppervlak.

Het grondwater wat zich door de scheidende laag omhoog verplaatst en de neerslag die infiltreert, zorgen samen voor het effect van de opbolling. De opbolling die ontstaat, komt voort uit het feit dat het freatisch grondwater⁴ af wil stromen naar het oppervlaktewater in de sloten. Deze sloten bevinden zich aan de weerszijden van de verharding. Het grondwater wat midden tussen de sloten terecht komt, doet er namelijk langer over om naar de sloten af te stromen. Daardoor bevindt zich daar gedurende een langere periode een grotere hoeveelheid grondwater en kan de opbolling ontstaan. Door de continue waterdruk, stijghoogte, die heerst onder de scheidende laag, wordt de afvoer van het grondwater naar de sloten weer aangevuld met het grondwater van de opwaartse kwel. Deze situatie zal plaatsvinden tot er weer een evenwicht bereikt wordt.

Er zijn verschillende formules om de opbolling van het grondwater te berekenen. In de wegenbouw is het gebruikelijk, dat men deze opbolling berekend aan de hand van de formule van Hooghoudt. Op het moment is er in de wegenbouw niks bekend over het gebruik van een andere formule voor het berekenen van de opbolling onder de wegverharding. De formule van Hooghoudt wordt namelijk al decennia gebruikt voor het bepalen van de opbolling onder de wegverharding. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de formule van Hooghoudt (1940) en de formule van Wesseling (1984). Officieel berekent de formule van Hooghoudt niet de opbolling onder de wegverharding, maar is deze formule door Hooghoudt (1940) ontwikkeld voor het bepalen van de afstand tussen drainagebuizen. Wesseling (1984) heeft zijn formule ontwikkeld voor het berekenen van de freatische grondwaterstand tussen twee watergangen.

In een voorgaand onderzoek van Damveld (2013) bij Aveco de Bondt is al eerder onderzoek gedaan naar de opbolling van grondwater onder verharde wegen. Hier is gebruik gemaakt van de formule van Hooghoudt. In het onderzoek heeft Damveld (2013) gekeken naar de nauwkeurigheid van de opbolling berekend met de formule van Hooghoudt (1940) in vergelijking met de werkelijk optredende opbolling. De conclusie die Damveld (2013) trok over de resultaten van de formule van Hooghoudt (1940) was dat de gemeten opbolling van het grondwater onder de weg op één van de drie locaties hoger uitvalt dan de verwachte opbolling. Deze hogere waarden worden volgens Damveld (2013) verklaard door optredende kwel⁵. Naar vermoeden zou deze kwel invloed hebben gehad op de resultaten. Deze invloed heeft ervoor gezorgd, dat in het onderzoek van Damveld (2013) op één van de drie locaties de formule van Hooghoudt (1940) niet voldoet aan de werkelijke opbolling. Er kan dus geconcludeerd worden uit het onderzoek van Damveld (2013) dat in één van de drie gevallen de formule niet voldoet.

¹ Zie voor een uitgebreide toelichting voor stijghoogtes Bijlage B.1

² Een scheidende laag betreft een slecht doorlatende of ondoorlatende laag, waar het water zich heel moeilijk door kan verplaatsen. Onder andere kleilagen behoren onder deze scheidende lagen.

³ De freatische grondwaterstand duidt de waterstand aan die boven de scheidende laag heerst. De bodemlaag boven de scheidende laag wordt ook wel aangeduid als het freatisch waterpakket.

⁴ Het grondwater van de freatische grondwaterstand in het freatisch waterpakket

⁵ Grondwater dat onder druk aan de oppervlakte uit de bodem komt

Naast dat het van groot belang is dat de opbolling niet hoger uitvalt dan in de theorie bepaald, is het ook belangrijk dat deze in de theorie niet te laag uitvalt. Dit zou betekenen dat het wegontwerp te dik wordt aangelegd en er wellicht bespaard had kunnen worden op bijvoorbeeld de dikte van de zandlaag in het wegcunet⁶. Een besparing van 5 centimeter in een wegcunet kan namelijk een grote



Figuur 3: Voorbeeld van een wegcunet

kostenbesparing in grondverzet en grondaankoop opleveren. Een voorbeeld van een wegcunet is weergegeven in Figuur 3, waarbij de gele zandgrond de grondverbetering in het wegcunet betreft. Het is daarbij wel van belang dat, bij zo'n dergelijke aanpassing, de stabiliteit van het gehele wegontwerp gewaarborgd blijft. Wanneer niet aan de stabiliteit voldaan wordt, zal de weg namelijk alsnog bezwijken en zal scheurvorming ontstaan zoals te zien in Figuur 1.

1.2 Probleem- en doelstelling

Door een onnauwkeurige bepaling van de opbolling onder de wegverharding kunnen dus een aantal vervelende situaties ontstaan. Er kan een onder of overgedimensioneerde dikte van het wegcunet aanwezig zijn. Een onderdimensionering kan leiden tot grondwaterstand die tot in de fundering van de weg opstuwt met als mogelijk gevolg vorstschade aan de weg. Een overdimensionering kan betekenen dat er een te grote hoeveelheid zand voor het wegcunet gebruikt zal worden. Dit resulteert in onnodig hogere kosten, kijkend naar grondaankoop en grondverzet.

Tot slot is er nog een belangrijk aandachtspunt, kijkend naar de stabiliteit van de weg. Een mogelijke besparing in de dikte van het wegcunet moet namelijk geen gevolgen hebben voor de stabiliteit van het wegontwerp. Wanneer deze stabiliteit niet gewaarborgd blijft, bezwijkt de weg en zal de schade enorm zijn.

Het onderzoek gaat zich dus richten op de juistheid van de berekende grondwaterstand in het wegcunet. De formule van Wesseling wordt gebruikt en deze resultaten zullen vergeleken worden met de resultaten van Damveld (2013) voor de formule van Hooghoudt. Daarnaast is het van belang dat onderzocht wordt of er een aanpassing in de dikte van het wegcunet gedaan kan worden, met als voorwaarde dat de wegfundering zijn stabiliteit behoudt. In één zin valt de doelstelling als volgt op te schrijven.

Doelstelling:

Bepalen of de formule van Wesseling een nauwkeurigere weergave van de grondwaterstand in het wegcunet geeft dan de formule van Hooghoudt, waarbij er vervolgens op basis van de stabiliteit bekeken wordt of er winst te behalen valt in het dunner maken van het in de fundering gelegen zandpakket van het wegcunet.

⁶ "Een in de wegenbouw uitgegraven gedeelte waar niet-draagkrachtige grond aanwezig was, ongeveer ter breedte van de aan te leggen weg." Vree (2015)

1.3 Onderzoeksvragen

Het onderzoek bestaat uit twee hoofdvragen. De hoofdvragen zijn vervolgens onderverdeeld in deelvragen. Deze deelvragen worden eerst beantwoord, voordat het mogelijk is de hoofdvragen te beantwoorden.

1^{ste} Hoofdvraag

Hoe gedraagt de formule van Wesseling zich in vergelijking met de formule van Hooghoudt ten opzichte van de praktijk?

Deelvragen:

1. Welke invloed geeft kwel op het freatisch grondwater berekend uit de stijghoogte in de ondergrond en de weerstand van de scheidende laag?
2. Hoe verhoudt de formule van Wesseling zich ten opzichte van de veldmetingen?
3. Geeft de formule van Wesseling of de formule van Hooghoudt een nauwkeurigere uitkomst ten opzichte van de praktijk en wat is het waarneembare verschil in uitkomsten?

2^{de} Hoofdvraag

In welke mate kan een aanpassing in de dikte van het wegcunet doorgevoerd worden, zodat het wegdek zijn stabiliteit niet verliest?

Deelvragen:

1. Wat zijn de mogelijke toetsingsmethoden voor de stabiliteit van de wegfundering en welke betreft de beste toetsingsmethode voor de stabiliteit?
2. Wat is de huidige samenstelling van de opbouw van de weg?
3. Wanneer is het mogelijk een besparing in de dikte van het wegcunet door te voeren?

1.4 Hypothese

Als uitkomst voor het onderzoek wordt verwacht dat de opbolling berekend door de formule van Wesseling een uitkomst geeft die nauwkeuriger is dan de opbolling berekend door de formule van Hooghoudt. Deze verwachting zal door veel mensen gezien worden als zeer onverwacht, aangezien de formule van Hooghoudt al vele jaren gebruikt wordt voor het berekenen van de opbolling in de wegebouw. Onder andere het CROW heeft de formule van Hooghoudt in zijn boeken opgenomen als dé formule voor het berekenen van de droogleggingseis. Daarnaast wordt verwacht dat, rekening houdend met de stabiliteit van de weg, het mogelijk is om een besparing door te kunnen voeren in de dikte van het wegcunet.

Naar aanleiding van de bovenstaande verwachtingen wordt de hypothese als volgt opgesteld:

De formule van Wesseling geeft een nauwkeurigere beschrijving van de opbolling in vergelijking met de opbolling die zich voor doet in de praktijk, waardoor het mogelijk is om een besparing in de dikte van het wegcunet door te voeren.

1.5 Methodiek

Het onderzoek bestaat uit twee hoofdvragen, waarbij de onderzoeksmethode per hoofdvraag op een aantal vlakken verschilt. In het onderzoek is gebruik gemaakt van literatuurstudie, een berekeningsstudie met de formules, een validatie aan de hand van veldmetingen en het vergaren van informatie via experts binnen het bedrijf Aveco de Bondt. Een belangrijk aspect van het onderzoek is dat er naast de theoretische studie ook gekeken is naar de praktische benadering. Hierdoor is in het onderzoek een koppeling gemaakt tussen de theorie en de praktijk. Onder de praktijk vallen de veldmetingen die gebruikt zijn, de gebruikte praktijkervaring van de ondervraagde experts en het gebruik van eventuele referentieprojecten of een nader onderzochte locatie in Nederland.

Hoofdvraag 1

Er is gebruik gemaakt van alle genoemde onderzoeksmethoden. In Deelvraag 1 is ten eerste een literatuurstudie uitgevoerd om te bepalen, welke eigenschappen er in de ondergrond aanwezig zijn. Hierbij moet gedacht worden aan diktes en soorten bodemlagen, waarna er aan de hand van contact met een waterexpert overleg plaatsgevonden heeft over het gedrag van kwel in de gevonden situaties. De deelvraag is uitgewerkt aan de hand van het bodemonderzoek in Bijlage A.3 en de onderdelen kwel en scheidende laag in Hoofdstuk 4.

Aan de hand van onder andere de informatie van Deelvraag 1 is verder gewerkt met de tweede deelvraag. Deze deelvraag is uitgevoerd aan de hand van een stappenplan, bestaande uit de stappen:

- Stap 1: Wat is de te verwachten grondwaterstand op de meetlocatie, berekend volgens de formule van Wesseling?
- Stap 2: Welke hoogte bereikt de grondwaterstand op de meetlocaties?
- Stap 3: Welk significant verschil tussen de formule van Wesseling en de meetlocaties is meetbaar?

In deze deelvraag is veelal een praktische benadering, uitgewerkt in Hoofdstuk 4, toegepast en daarbij is een berekeningsstudie met formules en een validatie aan de hand van veldmetingen gebruikt. Als extra toevoeging is een theoretisch deel toegevoegd voor extra informatie ten behoeve van de formules. In dit theoretisch deel, te vinden in de Hoofdstukken 2 en 3, heeft voornamelijk literatuurstudie plaatsgevonden en is wederom een berekeningsstudie toegepast.

Tot slot is aan de hand van de analyse van de resultaten van de praktische benadering en het integreren van de formule van Hooghoudt in deze gegevens voor Deelvraag 3 een conclusie geformuleerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de veldmetingen en de berekeningsstudie, maar is vooral de focus gelegd op een vergelijking van de formules met de veldmetingen en dus het praktisch onderdeel van het onderzoek. De antwoorden op Deelvraag 3 vallen daardoor terug te vinden in de resultaten en conclusies van Hoofdstuk 4.

Hoofdvraag 2

In deze hoofdvraag is enkel gebruik gemaakt van een uitgebreide literatuurstudie en het benaderen van experts. De uitwerking van de drie deelvragen bijbehorend bij Hoofdvraag 2 zijn volledig uitgewerkt in Hoofdstuk 5. Hierbij zijn Deelvragen 1 en 2 uitgewerkt in de Paragrafen 5.1 en 5.2. Deelvraag 1 wordt voornamelijk onderbouwd in Paragraaf 5.1, waarbij enkel literatuurstudie is uitgevoerd en Deelvraag 2 is voornamelijk onderbouwd in Paragraaf 5.2, waarbij ook veel overleg met een expert op het gebied van het wegontwerp plaats heeft gevonden. Vervolgens is in Paragraaf 5.3 onder andere aan de hand van de informatie van de Deelvragen 1 en 2 en een vraagstelling aan de expert op het gebied van wegontwerp Deelvraag 3 uitgewerkt.

2 Achtergrond van Hooghoudt en Wesseling

Gedurende dit hoofdstuk is aandacht besteedt aan de formule van Wesseling (1984) en de formule van Hooghoudt (1940). Deze twee formules zijn volop gebruikt gedurende het onderzoek, waardoor het van groot belang is dat geen onduidelijkheden ontstaan over deze formules. In dit hoofdstuk zijn de formules afzonderlijk behandeld. Eerst is aandacht besteedt aan het visualiseren en uitschrijven van de formules, zodat deze gebruikt kunnen worden voor het berekenen van de opbolling. Vervolgens zijn per formule de parameters beschreven om inzicht te krijgen in de eigenschappen en functies van de verscheidene parameters in de betreffende formule. Achter de titel met de parameter is de afkorting voor de parameter tussen de haakjes geschreven. Deze afkortingen zijn ook gebruikt in de visualisaties van Figuur 4 en Figuur 5, zodat duidelijk terug te vinden is wat de betreffende parameter voorstelt in een situatie met een opbolling.

2.1 Formule van Wesseling

Onder de formule van Wesseling (1984) wordt verstaan: de beschrijving van het verloop van de freatische grondwaterstand tussen sloten. Freatisch grondwater wil zeggen dat het grondwater zich in een goed doorlatende laag boven een slecht doorlatende laag of ondoorlatende laag bevindt. Hierbij kan zich in klei ook freatisch grondwater bevinden en in dat geval bevindt zich onder de kleilaag een laag die meer ondoorlatend is dan de kleilaag zelf. Een overzicht van de situatie wordt weergegeven in Figuur 4. Hieruit volgt dat de formule van Wesseling de freatische grondwaterstand berekend op elk punt. Wanneer men alleen het stuk opbolling wil bepalen, moet de hoogte van het slootwaterpeil van de formule afgetrokken worden. Kijkend naar Figuur 4 betreft dit Vergelijking 2.1:

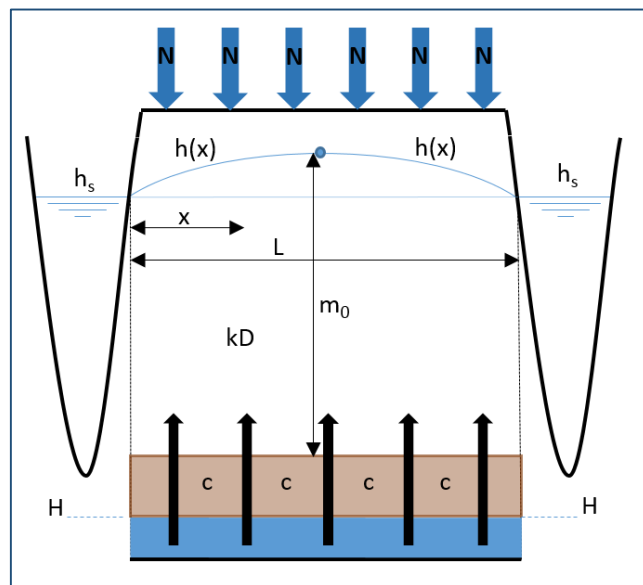
$$m_0 = \text{maximum}(h(x)) - h_s \quad (2.1)$$

Hierbij geldt voor de toepassing van de formule van Wesseling, dat deze de opbolling beschrijft tussen volkomen sloten zonder intreeweerstand in kwelgebieden. Daarbij houdt de formule van Wesseling vooral rekening met de aanvoer van onderaf, de kwel. De formule van Wesseling ziet er in Formule 2.2 als volgt uit (Grondwaterformules.nl, 2009; Wesseling & Wesseling, 1984):

$$h(x) = h_s + (H - h_s + N_c) \left\{ \tanh\left(\frac{L}{2\lambda}\right) \sinh\left(\frac{x}{\lambda}\right) - \cosh\left(\frac{x}{\lambda}\right) + 1 \right\} \quad (2.2)$$

Met $h(x)$ is in Formule 2.2 de freatische grondwaterstand weergegeven. De maximale opbolling en dus de maximale hoogte van de freatische grondwaterstand kan vervolgens bepaald worden door $x = L/2$ in te vullen in Formule 2.2. De formule voor de opbolling, Formule 2.3, wordt vervolgens verkregen (Grondwaterformules.nl, 2009; Wesseling & Wesseling, 1984):

$$m_0 = h_s + (H - h_s + N_c) \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{L}{2\lambda}\right)} \right\} \quad (2.3)$$



Figuur 4: Schets situering opbolling formule van Wesseling inclusief kwel en neerslag

De parameters vallen volgens Grondwaterformules.nl (2009) bij de Formules 2.1 - 2.7 en Figuur 4 als volgt te definiëren:

- m_0 = maximale opbolling van het freatisch grondwater boven het slootniveau (m)
- $h(x)$ = Freatische grondwaterstand (m boven N.A.P.)
- x = Horizontale afstand van de sloot tot een punt op de freatische grondwaterstand (m)
- h_s = Waterpeil (m boven N.A.P.)
- H = Stijghoogte onder de scheidende laag (m)
- N = Neerslag (m/dag)
- c = Weerstand van de scheidende laag (dag)
- L = Afstand tussen de sloten (meter)
- λ = Spreidingslengte (meter)

De spreidingslengte zal apart bepaald moeten worden aan de hand van de formule $\lambda = \sqrt{kD \cdot c}$. Hierbij staat k voor de doorlatendheid van de bodem in dag^{-1} en D staat voor de dikte van deze doorlatende laag in meters. De c betreft wederom de weerstand van de scheidende laag in dagen. (Maas, 2008)
 Met het invullen van de spreidingslengte uit Formule 2.4 wordt de volgende formule van Wesseling voor het berekenen van de freatische grondwaterstand gegeven (Formule 2.5):

$$\text{Invullen } \lambda = \sqrt{k \cdot D \cdot c} \quad (2.4)$$

$$m_0 = h_s + (H - h_s + N) \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{L}{2 \cdot \sqrt{k \cdot D \cdot c}}\right)} \right\} \quad (2.5)$$

De formules met betrekking tot de freatische grondwaterstand voor de kwelintensiteit en de afvoer naar sloten zijn volgens Drecht (1997) in Formule 2.6 en 2.7 als volgt geformuleerd:

Voor de kwelintensiteit (m/dag):

$$q_s = \left(\frac{H - h_s}{c} + N \right) \frac{2\lambda}{L} \tanh\left(\frac{L}{2\lambda}\right) - N \quad (2.6)$$

Voor de afvoer naar sloten (m/dag):

$$q_d = \left(\frac{H - h_s}{c} + N \right) \frac{2\lambda}{L} \tanh\left(\frac{L}{2\lambda}\right) \quad (2.7)$$

Met de Formules 2.6 en 2.7 kan bepaald worden hoe de kwel zich gedraagt rondom en in het freatisch grondwater. De $\tanh$ in de Formules 2.6 en 2.7 betreft een inverse tangus welke een hyperbolische functie verklaard.

2.2 Parameterbeschrijving formule van Wesseling

In deze paragraaf is aandacht besteedt aan alle parameters die zich bevinden in de formule van Wesseling (1984). Elke parameter is dan ook uitgebreid behandeld, zodat de functie van de parameter in de formule bekend is.

2.2.1 Freatisch waterpeil (h_s)

De freatische waterstand betreft de hoogte van de top van de scheidende laag tot en met het slootwaterpeil in de sloten. De parameter wordt gegeven in meters. De meest eenvoudige manier om aan deze parameter te komen is door deze te meten aan de hand van bijvoorbeeld een peilbuis. Een slootpeil is afhankelijk van de weersomstandigheden en het kan voorkomen dat bij veel droogte de sloot droog komt te liggen.

2.2.2 Stijghoogte onder de scheidende laag (H)

In dit geval betreft de parameter H , zoals de titel vermeldt, de stijghoogte onder de scheidende laag in meters. Uit een bodemonderzoek, zoals in Bijlage A.3, kan men halen of er een scheidende laag aanwezig is in de ondergrond. Vervolgens zal men moeten bepalen wat de stijghoogte is onder deze scheidende laag. Dit kan aan de hand van gegevens van peilbuizen op de locatie. In Bijlage B.1 “Bepalen en definiëren van een stijghoogte” is gedetailleerd beschreven wat een stijghoogte is, hoe deze stijghoogtes werken en op welke manier deze stijghoogtes bepaald worden.

2.2.3 Neerslag (N)

Onder neerslag verstaan we al het water dat vanuit de lucht op de oppervlakte van de aarde valt. Een ander woord hiervoor is hemelwater. (KNMI, Neerslag, 2015) Van Dreven et al. (2000, p. 993) geeft als definitie “de massa waterdeeltjes, zowel vloeibaar als vast, die vanuit de atmosfeer het aardoppervlak bereiken”. De neerslag kan vervolgens afstromen via de verharding naar de sloten of infiltreren⁷ in de ondergrond. Op de site van het KNMI valt een breed scala aan neerslaggegevens te vinden. (KNMI, 2015) Ook bestaat er de mogelijkheid om voor neerslaggegevens contact op te nemen met één van de waterschappen.

2.2.4 Weerstand van de scheidende laag (c)

Bij de weerstand van de scheidende laag wordt in het geval van de formule van Wesseling (1984) bedoeld op de verticale weerstand. Van Dreven et al. (2000, p. 999) definieert verticale weerstand als “de weerstand die een bepaalde laag biedt tegen een verticale stroming”. Deze weerstand wordt gegeven in dagen. Bij de scheidende laag is de weerstand in de meeste gevallen erg groot. De scheidende laag bestaat namelijk bijna altijd uit een kleilaag en deze staan bekend als slecht doorlatende lagen.

2.2.5 Watervoerende dikte van de top laag (D)

De watervoerende top laag bevindt zich boven de scheidende laag en betreft dus het freatisch waterpakket. Er is sprake van een zandlaag en deze zandlaag reikt van de top van de scheidende laag tot aan het maaiveld. De parameter beschrijft dus de dikte van deze watervoerende laag en heeft de eenheid meters.

2.2.6 Doorlatendheid van het freatisch watervoerend pakket (k)

Zoals net benoemd onder “Watervoerende dikte van de top laag (D)” is het freatisch watervoerend pakket een zandlaag. De doorlatendheid wordt door Van Dreven et al. (2000, p. 997) gedefinieerd als “een maat voor het vermogen van een watervoerend pakket om water door te laten, gelijk te stellen

⁷ “het verschijnsel dat water aan het grondoppervlak de grond binnentreedt” (Van Dreven, et al., 2000, p. 998)

aan de volumestroom⁸ die per breedte-eenheid van het watervoerend pakket en per eenheid van stijghoogtegradiënt door een watervoerende laag stroomt”. Zandlagen staan bekend als goed doorlatend. De doorlatendheid heeft als eenheid meter per dag. Van Dreven et al. (2000, p. 163) geeft als grove schatting voor goed doorlatende lagen van zand een k-waarde tussen de 1,0 en 10 meter per dag.

2.2.7 Spreidingslengte (λ)

Van der Gaast en Massop (2003) definiëren de spreidingslengte als volgt: “De spreidingslengte (λ) is een maat voor de invloedafstand van peilverschillen en kan gebruikt worden om de invloed van peilveranderingen op de grondwaterstroming te bepalen”.

De formule voor de spreidingslengte wordt als volgt geschreven: $\lambda = \sqrt{k \cdot D \cdot c}$ (Formule 2.4). Hiervan kan men wat betreft de parameters uitgaan van de toelichting zoals besproken in dit hoofdstuk. De formule wordt letterlijk gedefinieerd als “de wortel uit het quotiënt van het doorlaatvermogen van een watervoerende laag en de som van de lekvermogens⁹ van begrenzend slecht doorlatende lagen (Comissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1986; Van der Gaast & Massop, 2003)

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de spreidingslengte in het freatisch waterpakket, de freatische spreidingslengte. Doordat er geen afdekkend pakket in de ondergrond aanwezig is, is de freatische spreidingslengte een maat voor de effecten in het freatisch pakket. (Van der Gaast & Massop, 2003)

2.3 Formule van Hooghoudt

Zoals gegeven in Cultuurtechnische vereniging (1988) wordt de formule van Hooghoudt gebruikt om te berekenen op welke afstand de drainbuizen van elkaar gelegd worden, zodat het grondwater zich niet verplaatst tot boven het maaiveld. Echter zijn er net als bij de formule van Wesseling mogelijkheden om de formule om te bouwen, zodat bijvoorbeeld de hoogte van de opbolling van het grondwater berekend kan worden. De formule volgens Hooghoudt (1940) is gegeven in Formule 2.8. Het omschrijven van de formule van Hooghoudt (1940) naar een berekening met als uitkomst de opbolling is gegeven in Formule 2.8 t/m Formule 2.13.

$$s = \frac{8 \cdot k_2 \cdot d \cdot m_0 + 4 \cdot k_1 \cdot m_0^2}{L^2} \quad (2.8)$$

$$8 \cdot k_2 \cdot d \cdot m_0 + 4 \cdot k_1 \cdot m_0^2 - s \cdot L^2 = 0 \quad (2.9)$$

$$a m_0^2 + b m_0 + c = 0 \quad (2.10)$$

$$a = 4 \cdot k_1; b = 8 \cdot k_2 \cdot d; c = -s \cdot L^2 \quad (2.11)$$

⁸ “het volume water dat per tijdseenheid door een gegeven oppervlak stroomt” (Van Dreven, et al., 2000, p. 999)

⁹ “Het lekvermogen is een maat voor het vermogen van een slecht doorlatende laag om water door te laten.” (Comissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1986)

$$m_0 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.12)$$

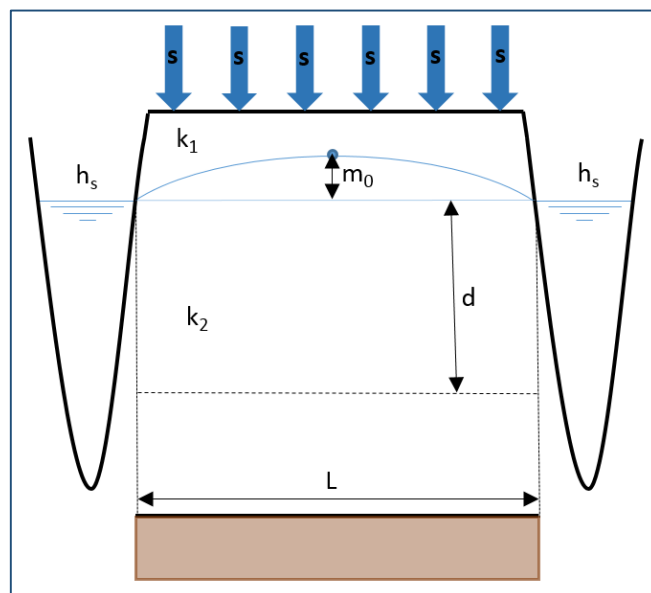
$$m_0 = \frac{-8 \cdot k_2 \cdot d + \sqrt{(8 \cdot k_2 \cdot d)^2 - 4 \cdot 4 \cdot k_1 \cdot -s \cdot L^2}}{2 \cdot 4 \cdot k_1} \quad (2.13)$$

De parameters worden bij Formule 2.8 t/m 2.13 als volgt gedefinieerd:

s	= afvoer naar de sloten (m/dag)
m_0	= de maximale hoogte van de freatische grondwaterstand boven het slootniveau (m)
L	= afstand tussen de sloten (m)
k_2	= doorlatendheid van de bodem onder het niveau van de slootbodembodem (m/dag)
k_1	= doorlatendheid van de bodem boven het niveau van de slootbodembodem (m/dag)
d	= dikte van de scheidende laag (m)

Dat bij de formule van Hooghoudt (1940) en de formule van Wesseling (1984) allebei de opbolling berekend kan worden, wil nog niet zeggen dat beide formules dezelfde methode hanteren. Vandaar dat in Figuur 5 een schets is gegeven van de situatie voor opbolling bij de formule van Hooghoudt met zijn parameters. Wanneer gekeken wordt naar Figuur 5 ziet men dat de opbolling, m_0 , die bij de formule van Hooghoudt berekend wordt direct het stuk opbolling betreft en niet de gehele freatische grondwaterstand.

Een groot verschil tussen de formule van Hooghoudt en de formule van Wesseling is dat in de formule van Wesseling geen rekening wordt gehouden met radiale weerstand¹⁰ nabij sloten. De formule van Hooghoudt beschikt wel over de mogelijkheid hiermee rekening te houden door de afvoer (q), het neerslagoverschot (N) en de radiale kwel bij elkaar op te tellen. Dit verklaart, waarom de formule van Hooghoudt (1940) voor de afvoer naar de sloten de parameter s , gegeven in meters per dag, gebruikt. Het betreft daar de optelling van alle meegenomen afvoeren. Bij de formule van Wesseling (1984) wordt alleen gebruik gemaakt van de neerslag N . De formule van Wesseling geldt dan ook alleen voor onvolkomen watergangen¹¹ en voor de formule van Hooghoudt is het voor zowel onvolkomen als volkomen watergangen¹² mogelijk de formule toe te passen. (Grondwaterformules.nl, 2009; Drecht, 1997)



Figuur 5: Schets situering opbolling formule van Hooghoudt inclusief aanvoer van bovenaf (s)

¹⁰ De weerstand tegen kwel die vanaf de zijanten ondergronds de sloten in stroomt

¹¹ Gedeeltelijk gevulde watergang

¹² Volledig gevulde watergang

2.4 Parameterbeschrijving formule van Hooghoudt

In deze paragraaf is aandacht besteedt aan alle parameters die zich bevinden in de formule van Hooghoudt (1940). Elke parameter is dan ook uitgebreid behandeld, zodat de functie van de parameter in de formule bekend is.

2.4.1 Afvoer naar de sloten (s)

In tegenstelling tot bij de Formule van Wesseling (1984) wordt bij de formule van Hooghoudt (1940) geen rekening gehouden met kwel. Hooghoudt (1940) neemt de afvoer mee, welke afkomstig is van boven, zoals bijvoorbeeld regen. Het betreft een optelsom van de volgende afvoeren: de afvoer (q), het neerslagoverschot (N) en de radiale kwel. Deze afvoeren worden gebruikt om de afvoer naar de sloten en dus de parameter s mee in te vullen. De totale afvoer naar de sloten wordt gebruikt met de eenheid meter per dag.

Het is van belang dat het duidelijk is wat het verschil is tussen radiale kwel en de kwel zoals geformuleerd bij de formule van Wesseling. Bij de formule van Wesseling doelt men met kwel op de grondwaterstromen die via de scheidende laag van het eerste watervoerend pakket naar het freatisch waterpakket stroomt. Zoals bij de uitleg van de stijghoogte onder de Paragraaf 2.2.2, genoemd veroorzaakt door een stijghoogteverschil tussen deze twee pakketten.

Met radiale kwel wordt de kwel bedoeld die vanaf het freatisch grondwaterpeil via het freatisch grondwater afstroomt naar de sloten. In Figuur 6 is aan de hand van de pijlen een voorbeeld gegeven van de stroming van deze radiale kwel. Uit dit verschil kan men dus opmaken dat de formule van Hooghoudt enkel rekening houdt met kwelstromen in het freatisch waterpakket en zich niet bezighoudt met kwelstromen afkomstig van lagen onder de scheidende laag.

Voor de radiale kwel geldt dat het mogelijk is deze apart te berekenen. Echter houdt Hooghoudt (1940) in de formule al rekening met de radiale kwel, doordat in de formule een equivalente diepte wordt toegepast. Deze equivalente diepte wordt verderop in de Paragraaf 2.4.4 toegelicht.

2.4.2 Afstand tussen de sloten (L)

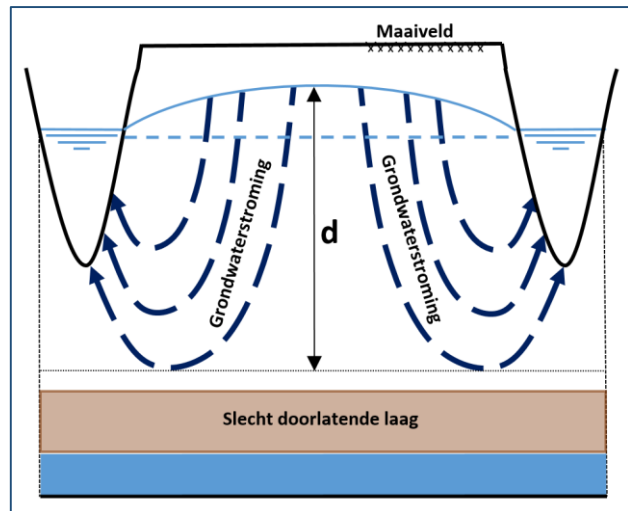
De afstand tussen de sloten betreft een simpele parameter die in meters wordt gemeten. In Figuur 5 valt goed te zien dat de afstand wordt gemeten tussen de locaties van de binnenkanten van de sloot waar het waterpeil rijkt. Dit valt te verklaren, doordat vanaf het oppervlaktewaterpeil de opbolling bij de zijkanen van de sloten zal starten.

2.4.3 Doorlatendheid van de bodem (k_1 en k_2)

De doorlatendheid van de bodem gaat uit van dezelfde principes als onder Paragraaf 2.2.6 bij de formule van Wesseling. Het verschil bij de formule van Hooghoudt (1940) is dat men gebruik maakt van twee parameters voor de doorlatendheid. De doorlatendheid van de bodem boven het slootpeil, aangeduid met k_1 , en de doorlatendheid van de bodem onder het slootpeil, aangeduid met k_2 . In Figuur 5 is gevisualiseerd waar deze scheiding tussen de parameters in de ondergrond zit. De bodem wordt dus in twee aparte k -waarden opgedeeld, zodat onderscheidt gemaakt wordt tussen de volledig verzadigde laag (k_2) en de (deels) onverzadigde laag (k_1). In de (deels) onverzadigde laag zal de opbolling en de infiltratie plaatsvinden. Het is van belang dat hier een nauwkeurige doorlatendheid wordt bepaald, omdat een afwijking op dit gebied als een onnauwkeurigheid door kan werken op de grootte van de opbolling. Vandaar een scheiding met k -waarden tussen de laag boven en onder het slootpeil.

2.4.4 Dikte van de equivalente diepte (d)

De dikte van de equivalente laag is een dikte, die gelijk of kleiner is aan de diepte waarop de scheidende laag ligt. Deze equivalente diepte beschrijft tot welke diepte de grondwaterstroming richting de sloten rijkt. Figuur 6 geeft een duidelijk voorbeeld van de werking van de equivalente diepte met de stromen van de radiale kwel. Dit verklaart waarom de equivalente diepte nooit dieper zal liggen dan het begin van de scheidende laag. De slechte doorlatendheid van deze scheidende laag werkt een verdere stroming dieper de grond in namelijk te hard tegen, waardoor het grondwater eerder zijn weg richting de sloot zal zoeken of op een bepaalde diepte zal blijven hangen. Met behulp van de dikte van de equivalente laag wordt het gebied van de radiale stroming in beeld gebracht. (Cultuurtechnische vereniging, 1988 ; Chieng, Broughton, & Ami, 1981)



Figuur 6: Visualisatie radiale kwel met zijn equivalente diepte

De equivalente laag kan bepaald worden aan de hand van Formule 2.14 (Cultuurtechnische vereniging, 1988, p. 514):

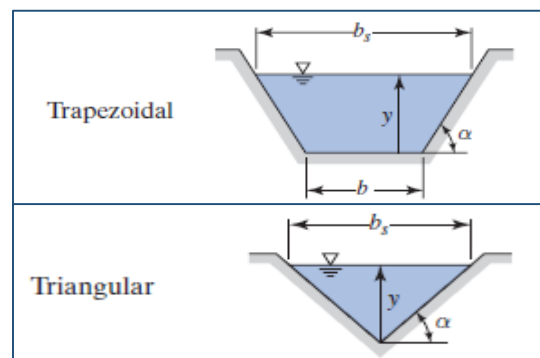
$$d = \frac{D}{1 + \frac{8D}{\pi L} \cdot \ln\left(\frac{D}{\pi r}\right)} \quad (2.14)$$

Daarbij geldt bij Formule 2.14 de volgende beschrijving van de parameters:

D	= diepte van de scheidende laag (m)
r	= natte omtrek van de drain/sloot (m)
L	= afstand tussen de drains/sloten (m)
d	= de equivalente diepte (m)

Naar aanleiding van een bodemonderzoek uit Bijlage A.3 wordt bekend op welke diepte de scheidende laag ligt. De afstand tussen de sloten valt gemakkelijk te bepalen door deze op locatie op te meten, maar de natte omtrek moet nog berekend worden. Hooghoudt (1940) stelt voor de natte omtrek van de sloot dat deze gelijk is aan $\pi \cdot r$.

Aangezien dit in Formule 2.15 en 2.16 aanwezig is valt deze term dus gemakkelijk te vervangen. De natte omtrek, aangeduid met parameter u , van de sloot valt gemakkelijk te bepalen aan de hand van formules uit de stromingsleer. Pritchard (2010) geeft de volgende formules voor de omtrek van een trapeziumvormige en driehoekige watergang (Figuur 7):



Figuur 7: Visualisatie parameters natte omtrek (Pritchard, 2010, p. 606)

Trapeziumvormig:

$$u = b + \frac{2y}{\sin \alpha} \quad (2.15)$$

Driehoekig:

$$u = \frac{2y}{\sin \alpha} \quad (2.16)$$

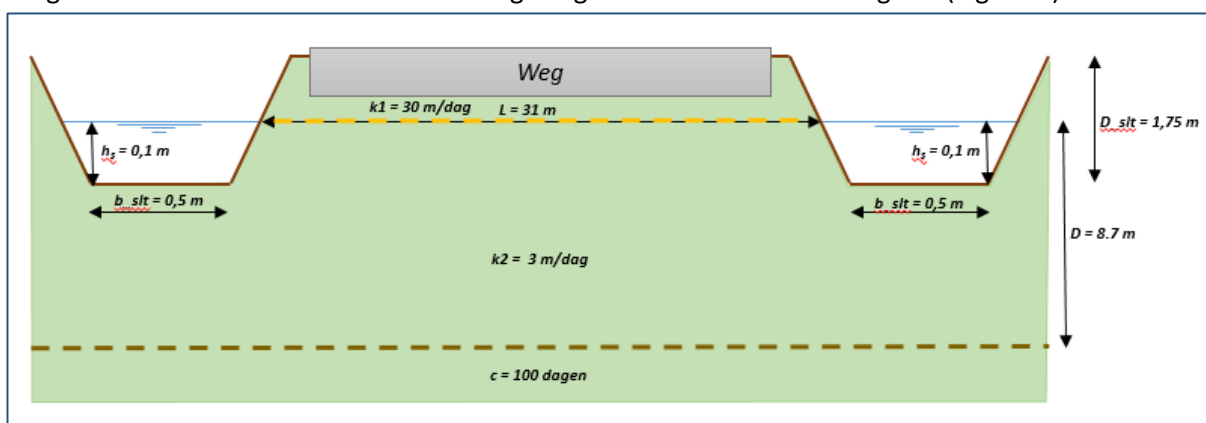
3 Theoretische studie van Hooghoudt en Wesseling

Om een inzicht te krijgen in het gedrag van de formules is het van belang dat deze voor bepaalde gekozen situaties ingevuld worden. Door voor beide formules dezelfde situatie met gelijke parameters in te vullen, kan direct bekeken worden wat het verschil in uitkomsten is tussen de formule van Hooghoudt en de formule van Wesseling. Daarnaast zal bekeken worden welke invloed een verandering in een enkele parameter heeft op beide formules en welke reactie dit op het verschil in uitkomst tussen de formules levert.

3.1 Test case

Voordat er een aanpassing van de parameters gedaan kunnen worden voor de verschillende situaties moet een standaard situatie gekozen worden voor de ondergrond en zijn omgeving. Voor deze maatgevende situatie is de voorbeeldlocatie te Apeldoorn, beschreven in de locatiebeschrijving van Bijlage A, gekozen. Hier is namelijk al de nodige informatie over bekend, vanuit onder andere het bodemonderzoek en het bezichtigen van de locatie.

De gekozen standaard situatie voor de omgeving en bodem ziet er als volgt uit (Figuur 8):



Figuur 8: Visualisering parameterkeuze standaard situatie

Zoals in Figuur 8 weergegeven zijn er parameters gekozen voor de standaard situatie. Deze parameters en de overige parameters die gebruikt zijn, zijn gegeven in Tabel 1.

3.1.1 Overzicht parameterwaarden

In Tabel 1 zijn alle parameterwaarden zoals gekozen en berekend gegeven voor zowel de formule van Wesseling als de formule van Hooghoudt. Met deze standaard situatie is de verdere theoretische formulestudie uitgevoerd.

Parameter Wesseling	Waarde
N	0,001 meter/dag
k	3,5025 meter/dag
c	100 dagen
H	9,6 meter
h_s	8,7 meter

Parameter Hooghoudt	Waarde
s (excl. Kwel-aanvulling)	0,001 meter/dag
Kwel-aanvulling ($Kwel_{hh}$)	0,009 meter/dag
$s_{aanvulling}$	0,010 meter/dag
k_1	30 meter/dag
k_2	3 meter/dag
d	3,5502 meter
h_s	0,1 meter

Algemene parameter	Waarde
D	8,7 meter
D_{slt}	1,75 meter
b_{slt}	0,5 meter
talud_slt	65 graden
L	31 meter

Tabel 1: Overzichten parameterwaarden formule van Hooghoudt, formule van Wesseling en algemene parameterwaarden

Er zijn drie parameters in Tabel 1 die berekend zijn aan de hand van de reeds bepaalde parameters. Dit betreft de parameter voor de doorlatendheid in de formule van Wesseling (k) en de parameters voor de equivalente diepte (d) en de kwelaanvulling, ($Kwel_hh$), voor de formule van Hooghoudt. De berekening van de equivalente laag (d) staat beschreven in Hoofdstuk 2.4.4 en is aan de hand van Formule 2.1 berekend. De bepaling van de doorlatendheid van het freatisch waterpakket voor Wesseling (k) de kwelaanvulling ($Kwel_hh$) voor de formule van Hooghoudt zullen nader toegelicht worden.

3.1.2 Doorlatendheid freatisch waterpakket formule van Wesseling (k)

De parameter k is een berekende waarde op basis van de twee doorlatendheden, k_1 en k_2 , welke gebruikt worden als parameters voor de doorlatendheid in de formule van Hooghoudt. De formule voor het bepalen van de parameter k voor de formule van Wesseling ziet als volgt uit (Formule 3.1):

$$k = \frac{D + (D_{slt} - h_s)}{\frac{D_{slt} - h_s}{k_1} + \frac{D}{k_2}} \quad (3.1)$$

Formule 3.1 beschrijft een berekening van de gemiddelde doorlatendheid van de ondergrond tot aan de scheidende laag. De formule van Wesseling neemt namelijk, zoals uitgelegd in Hoofdstuk 2.2.6 voor het gehele freatisch waterpakket één waarde van de doorlatendheid. De formule van Hooghoudt gebruikt twee doorlatendheden en deze moeten dus voor de formule van Wesseling weer omgeschreven worden naar een enkele gemiddelde waarde. Deze middeling zal een effect hebben op de resultaten bij de formule van Wesseling. De verwachting is dat deze middeling een betere representatie geeft, omdat meerdere grondlagen meegenomen zijn. Dit betekent een nauwkeurigere benadering van de doorlatendheid van de ondergrond en dus een extra nauwkeurigheid in de berekening van de opbolling. De analyses zullen echter uitwijzen of deze verwachting juist is.

3.1.3 Kwelaanvulling voor de formule van Hooghoudt ($Kwel_hh$)

Zoals in Hoofdstuk 2.4.1 uitgelegd, houdt Hooghoudt (1940) geen rekening met de kwelaanvoer vanaf onder de scheidende laag. Wanneer bekend is dat er kwelaanvoer is vanaf onder de scheidende laag maakt men in de praktijk gebruik van een grove schatting van het aantal millimeter van deze kwel. Vervolgens past men de bepaalde hoeveelheid kwel toe als een neerslag van boven. (Meinders, 2015) Men telt het aantal millimeter kwel dus op bij de reeds aanwezige aanvoer (s) die op Hooghoudt van toepassing is. Deze extra aanvoer van kwel, in dit verslag benoemd als kwelaanvulling, zal meegenomen worden bij het vergelijken van de formules. Om deze hoeveelheid kwel mee te nemen bij de formule van Hooghoudt, wordt deze, net zoals in de praktijk, opgeteld bij de aanvoer van bovenaf (*parameter* $Kwel_hh$). De formule voor de berekening van de kwelaanvulling is als volgt (Formule 3.2):

$$Kwel_{hh} = \frac{H - h_{swes}}{c} \quad (3.2)$$

3.2 Analyse met kwel- en neerslagsituaties

Voor het onderzoeken van het gedrag van de formules bij bepaalde hoeveelheden en combinaties neerslag en kwel zullen een aantal situaties ingevuld worden. De parameters zullen, op de parameters voor neerslag, kwel, kwelaanvulling en stijghoogte na, volgens de gekozen standaardsituatie ingevuld worden. Deze vier parameters zijn in de praktijk namelijk de parameters welke in een korte tijd een grote verandering kunnen ondergaan en hierdoor een waarneembaar effect op de opbolling veroorzaken. In Tabel 2 en Tabel 3 zijn de verschillende situaties weergegeven

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

met de veranderde parameters, de uitkomsten van de opbolling en het verschil van uitkomst in opbolling tussen de twee formules. Naast de resultaten van Tabel 2 waar de kwelaanvulling in Hooghoudt toegepast is, is ook een berekening uitgevoerd waar de kwelaanvulling bij de formule van Hooghoudt is weggelaten (zie Tabel 3). Dit betekent dat voor de formule van Hooghoudt in de resultaten van Tabel 3 geen rekening is gehouden met kwel afkomstig van onder de scheidende laag. Er is dus enkel met de radiale kwel, die al in de formule verwerkt zit, rekening gehouden. Als er geen kwel plaatsvindt van onderaf betekent dit, dat de stijghoogte gelijk is aan het freatisch grondwaterpeil. Dit verklaart het feit dat in de Tabel 2 en Tabel 3 in de situaties zonder kwel een stijghoogte van 8,7 meter wordt gegeven. Dit betreft namelijk dezelfde hoogte als de freatische grondwaterstand (h_s uit de formule van Wesseling).

Voor de regenbuien geldt dat een regenbui van rond de 3 millimeter neerslag als klein beschouwd wordt en een middelmatige regenbui overeenkomt met een natte dag en een waarde van om en nabij 10 millimeter neerslag krijgt. Een zware regenbui wordt aangenomen bij een neerslag van 50 millimeter. (KNMI, Regenintensiteit, 2014) Voor de stijghoogte wordt aangenomen dat een kleine stijghoogte 0,20 meter is, een middelmatige stijghoogte 0,80 meter en een grote stijghoogte 2,00 meter. Respectievelijk resulteert dit dus in een kleine, middelmatige en grote kwel.

Parameter Situatie	Neerslag (N in meter)	Stijghoogte (H in meter)	Kwel- aanvulling (Kwel_{hh} in meter)	Aanvoer Hooghoudt (s + Kwel_{hh} in meter)	Opbolling Hooghoudt (in meter)	Opbolling Wesseling (in meter)	Vershil in opbolling (in meter)
Geen Aanvoer	0	8,70	0	0	0	0	0
Alleen kleine regenbui	0,003	8,70	0	0,003	0,0363	0,0004	0,0363
Alleen middelmatige regenbui	0,010	8,70	0	0,010	0,1090	0,0014	0,1076
Alleen piekneerslag	0,050	8,70	0	0,050	0,3930	0,0070	0,3860
Alleen kleine kwel	0	8,90	0,002	0,002	0,0246	0,0279	-0,0032
Alleen middelmatige kwel	0	9,50	0,008	0,008	0,0896	0,1115	-0,0219
Alleen grote kwel	0	10,70	0,020	0,020	0,1951	0,2786	-0,0835
Kleine aanvoer van beiden kanten	0,003	8,90	0,002	0,005	0,0585	0,0283	0,0302
Middelmatige aanvoer van beide kanten	0,010	9,50	0,008	0,018	0,1791	0,1128	0,0662
Grote aanvoer van beide kanten	0,050	10,70	0,020	0,070	0,4986	0,2856	0,2129
Grote kwel, kleine neerslag	0,003	10,70	0,020	0,023	0,2182	0,2791	-0,0608
Kleine kwel, Grote neerslag	0,050	8,90	0,002	0,052	0,4043	0,0348	0,3694

Tabel 2: Situaties bij verandering in kwel en neerslag inclusief toepassing kwelaanvulling

<i>Situatie</i> \ <i>Parameter</i>	<i>Neerslag (N en s in meter)</i>	<i>Stijghoogte (H in meter)</i>	<i>Opbolling Hooghoudt (in meter)</i>	<i>Opbolling Wesseling (in meter)</i>	<i>Vershil in opbolling (in meter)</i>
Geen Aanvoer	0	8,70	0	0	0
Alleen kleine regenbui	0,003	8,70	0,0363	0,0004	0,0363
Alleen middelmatige regenbui	0,010	8,70	0,1090	0,0014	0,1076
Alleen piekneerslag	0,050	8,70	0,3930	0,0070	0,3860
Alleen kleine kwel	0	8,90	0	0,0279	-0,0279
Alleen middelmatige kwel	0	9,50	0	0,1115	-0,1115
Alleen grote kwel	0	10,70	0	0,2786	-0,2786
Kleine aanvoer van beiden kanten	0,003	8,90	0,0363	0,0283	0,0080
Middelmatige aanvoer van beide kanten	0,010	9,50	0,1090	0,1128	-0,0039
Grote aanvoer van beide kanten	0,050	10,70	0,3930	0,2856	0,1074
Grote kwel, kleine neerslag	0,003	10,70	0,0363	0,2791	-0,2428
Kleine kwel, Grote neerslag	0,050	8,90	0,3930	0,0348	0,3582

Tabel 3: Situaties bij verandering in kwel en neerslag exclusief toepassing kwelaanvulling

3.2.1 Resultaten analyse kwel- en neerslagsituaties

De uitwerking van de resultaten is in deze paragraaf opgedeeld in drie onderdelen. Een onderdeel met resultaten inclusief kwelaanvulling, exclusief kwelaanvulling en een onderdeel met resultaten die betrekking heeft op zowel Tabel 2 inclusief kwelaanvulling als Tabel 3 exclusief kwelaanvulling.

Kwel- en neerslagwijzigingen inclusief kwelaanvulling

Allereerst is bekeken, welke verschillen er in opbolling tussen de formules optreden. Alle resultaten inclusief het toepassen van de kwelaanvulling zijn gegeven in Tabel 2. Wat direct opvalt is de situatie zonder aanvoer. Hierbij komen beide formules exact uit op een opbolling van 0 centimeter. Er heerst dus geen opbolling als er geen aanvoer aanwezig is. Dit valt te verklaren, doordat op dat moment een evenwicht bereikt is tussen de waterdruk van boven en de waterdruk van onder de scheidende laag. Hierdoor blijft het grondwaterpeil continu op dezelfde diepte. Dit evenwicht wordt enkel verstoord bij een aanvoer van extra grondwater van boven of van onder de scheidende laag. Er ontstaat dan een drukverschil door deze verstoring, dus aanvoer, en er zal opbolling ontstaan. Dit volgt ook uit de resultaten.

Wanneer er neerslag aanwezig is, krijgt de formule van Hooghoudt bij de situatie met een grote kwel en een kleine neerslag na altijd een grotere uitkomst in de opbolling. Bij de situaties met enkel kwel valt op dat de formule van Wesseling een grotere opbolling genereert dan de formule van Hooghoudt. Ook in de situatie met een grote kwel en een kleine neerslag genereert de formule van Wesseling nog een aanzienlijk grotere opbolling dan de formule van Hooghoudt met een verschil van ongeveer 6 centimeter. Wanneer echter een middelmatige of piekneerslag plaatsvindt, heeft deze neerslag een groot effect op de formule van Hooghoudt en genereert deze ook een grotere opbolling.

Als naar de grootte van de verschillen gekeken wordt kan geconstateerd worden dat in het geval van een grotere opbolling bij de formule van Hooghoudt, de orde grootte van het verschil in de opbolling hoger ligt. Vooral wanneer er een grote hoeveelheid neerslag valt en geen tot weinig kwel aanwezig is, loopt dit verschil op tot ongeveer 37 centimeter in de opbolling. Bij een situatie met een grotere opbolling voor de formule van Wesseling loopt het verschil op tot ongeveer 8,5 centimeter met de voorwaarde, dat er niet of nauwelijks neerslag en een grote kwel aanwezig is.

Uit de resultaten voor de formule van Hooghoudt volgt, dat de opbolling heel gevoelig is voor de hoeveelheid neerslag en dat bij een grote neerslag de opbolling snel hoog uitvalt. Wanneer bijvoorbeeld bij een grote kwel zoals in de parameterinvulling van Tabel 2 een kwelaanvulling van 20 millimeter ontstaat, betreft dit voor de formule van Hooghoudt een toevoeging van een hele stevige regenbui. Hierdoor ontstaat door de toevoeging van de kwelaanvulling dus een grote extra opbolling. In Tabel 2 inclusief kwelaanvulling geeft deze situatie namelijk een opbolling van 0,1951 meter en in Tabel 3 geeft de situatie met alleen grote kwel een opbolling van 0 meter. Deze kwelaanvulling zorgt in deze situatie dus voor een opbolling van ongeveer 19,5 centimeter.

Kwel- en neerslagwijzigingen exclusief kwelaanvulling

De resultaten bijbehorend bij deze paragraaf zijn te vinden in Tabel 3. Het eerste punt dat opvalt, is dat, kijkend naar het verschil tussen Tabel 2 en Tabel 3, er enkel een verandering optreedt als er kwel aanwezig is. Ook valt het op dat de formule van Wesseling geen wijziging in uitkomsten voor de opbolling heeft gekregen en de formule van Hooghoudt een verandering heeft ondergaan. Deze verandering valt te verklaren aan het feit dat in de formule van Hooghoudt geen kwelaanvulling meer meegenomen wordt. Hierdoor verkleint de aanvoer voor de formule van Hooghoudt of is er in het geval van enkel kwel zelfs totaal geen aanvoer. Dit is terug te vinden in Tabel 3 in situaties met alleen kwel, waar de opbolling bij de formule van Hooghoudt 0 centimeter is. De formule van Wesseling genereert dezelfde uitkomsten, omdat de kwelaanvulling niks te maken heeft met de formule van Wesseling.

In de situaties met kwel, vooral bij een grote kwel, is het verschil in opbolling een stuk groter. Bij dit verschil genereert de formule van Wesseling de grotere opbolling en dit verschil loopt op tot ongeveer 28 centimeter bij enkel een grote kwel, waar dit verschil bij Tabel 2 8,5 centimeter betreft. Waar in Tabel 3 bij een grotere opbolling voor de formule van Wesseling de verschillen nu aanzienlijk groter geworden zijn, zijn in situaties met grotere opbolling voor de formule van Hooghoudt de verschillen van dezelfde orde grootte.

Tot slot valt het op dat de verschillen bij de situaties met een middelmatige en kleine aanvoer van beide kanten erg klein zijn. De uitkomsten van de formules liggen daar heel dicht bij elkaar. Bij de kleine aanvoer geeft de formule van Hooghoudt enkel een opbolling die 8 millimeter groter is en bij een middelmatige aanvoer geeft de formule van Wesseling enkel een opbolling die 3,9 millimeter groter is.

Overeenkomsten tussen de resultaten inclusief en exclusief kwelaanvulling

Uit Tabel 2 en Tabel 3 volgt een vergelijkend resultaat kijkend naar situaties met enkel neerslag of enkel kwel. In het geval van enkel een neerslag berekent de formule van Hooghoudt een grotere opbolling en bij enkel kwel wordt door de formule van Wesseling een grotere opbolling berekend. Dit valt te verklaren aan de hand van de resultaten uit de parameterstudie in Hoofdstuk 2. Hier is naar voren gekomen, dat de formule van Hooghoudt alleen rekening houdt met de aanvoer van bovenaf (s) en de formule van Wesseling zich bezig houdt met de aanvoer van onderaf, kwel.

De formule van Wesseling neemt de neerslag wel mee in zijn formule, maar past deze toe door het aantal millimeter neerslag als een verschil in stijghoogte te zien en deze bij het stijghoogteverschil

volgens uit de kwel op te tellen. Deze handeling bij de formule van Wesseling is de verklaring voor de kleine invloed die de neerslag levert op de opbolling. Dit valt te zien in Tabel 2 en Tabel 3. De situaties waarbij alleen neerslag aanwezig is, geven dit goed weer. Idem geldt dit voor de formule van Hooghoudt als naar de kwel gekeken wordt. In Tabel 3 waar geen kwelaanvulling aanwezig is, geeft de formule van Hooghoudt namelijk altijd een opbolling van 0 centimeter in situaties met alleen kwel.

3.2.2 Conclusie

Aan de hand van de geanalyseerde resultaten met bijbehorende verklaringen kunnen de volgende conclusies getrokken worden over de formules, kijkend naar het invullen van bepaalde situaties in de formules betreffende de kwel, neerslag en het toepassen van de kwelaanvulling in de formule van Hooghoudt.

Uit de resultaten volgt, dat met 100% zekerheid gezegd mag worden, dat de formule van Hooghoudt op geen enkele manier rekening houdt met kwel. Een kwelaanvulling zoals gebruikt in Tabel 2 zorgt ervoor dat deze kwel meegenomen wordt, maar deze compensatie, zoals deze in de praktijk als grove schatting meegenomen wordt, is gezien het oplopende verschil bij het vergroten van de kwel te onnauwkeurig om te stellen dat dit een oplossing is voor het meenemen van de kwel in de formule van Hooghoudt. Er kan dus geconcludeerd worden dat de formule van Wesseling de kwel in alle situaties beter benaderd. Uit de resultaten betreffende het gedrag van beide formules op de neerslag kan gesteld worden, dat de formule van Hooghoudt een groot effect in de grootte van de opbolling ondervindt. De formule van Wesseling ondervindt daarentegen nauwelijks een vergroting in de opbolling wanneer een neerslag aanwezig is. Vanuit de resultaten kan dus op basis van de theorie geconcludeerd worden, dat de formule van Hooghoudt de aanvoer van boven beter benaderd dan de formule van Wesseling.

3.3 Parametergevoeligheidsanalyse

Om goed te kunnen analyseren welke invloeden de parameters hebben op de formules is voor de volgende parameters onderzocht welke reactie een verhoging en verlaging deze levert op de uitkomst van de opbolling:

- Dikte van het freatisch waterpakket (D)
- Afstand tussen de sloten (L)
- Waterpeil in de sloten (h_s)
- Neerslag Wesseling in combinatie met de afvoer bij Hooghoudt (N en s)
- Doorlatendheid boven het slootwaterpeil (k_1)
- Doorlatendheid onder het slootwaterpeil (k_2)
- Stijghoogte onder de scheidende laag (H)
- Weerstand van de scheidende laag (c)

De doorlatendheid bij Wesseling (k) is niet meegenomen, omdat deze uit de doorlatendheden van Hooghoudt (k_1 en k_2) volgen en bij deze analyses dus al meegenomen wordt. De equivalente diepte (d) is niet meegenomen, omdat deze ook afkomstig en afhankelijk is van een aantal van de bovenstaande parameters (D , L , h_s , b_{silt} en $talud_{silt}$). Hetzelfde geldt voor de kwelaanvulling ($Kwel_{hh}$) die voortkomt uit de parameters H , c en h_s uit de formule van Wesseling.

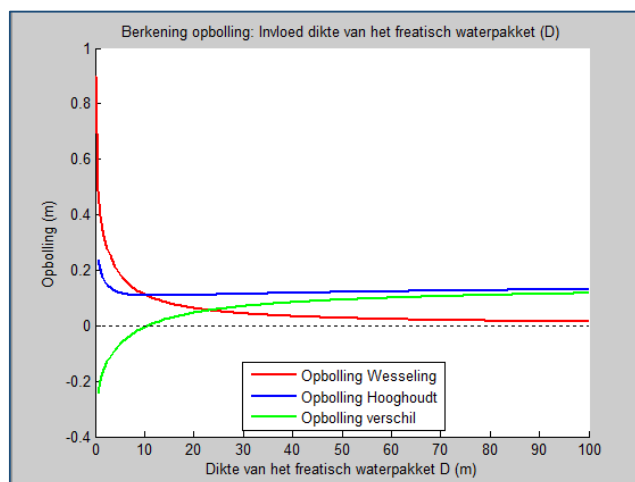
Met behulp van de standaardsituatie als basis is met een aanpassing in de parameters gewerkt. Naast de uitkomsten van de opbolling voor de formules is ook het verschil in uitkomst van de opbolling tussen de twee formules weergegeven. Er is gebruik gemaakt van het plotten van grafieken

om het verloop van de opbolling en het verschil weer te geven. Deze grafieken zijn weergegeven in de Figuren 9 t/m 16.

3.3.1 Dikte van het freatisch waterpakket (D)

Bij de dikte van het freatisch waterpakket is gekozen voor een interval van 0 meter dikte tot en met 100 meter dikte. Er is begonnen bij 0 meter om het verloop van de kleine diktes van het freatisch waterpakket te kunnen analyseren. Uit Figuur 9 valt het volgende op te merken:

- Vanaf een dikte van 10 meter van het freatisch waterpakket geeft de formule van Wesseling een lagere opbolling. Daarvoor valt de formule van Wesseling hoger uit.
- De dikte van het freatisch waterpakket heeft een kleine invloed op de formule van Hooghoudt. De opbolling blijft hangen tussen de 10 en 15 centimeter
- Beide formules zoeken naarmate de dikte van het freatisch waterpakket groter wordt een constante waarde



Figuur 9: Invloed dike van het freatisch waterpakket (D)

op voor de opbolling. Vanaf een diepte van 20 meter wordt deze waarde ongeveer bereikt voor de formule van Hooghoudt en vanaf 75 meter voor de formule van Wesseling. De dikte van het freatisch waterpakket heeft vanaf deze waardes niet of nauwelijks invloed meer op de uitkomst van de formules. De formule van Hooghoudt zoekt een waarde van ongeveer 17 centimeter op en de formule van Wesseling zoekt een waarde van 3 centimeter op.

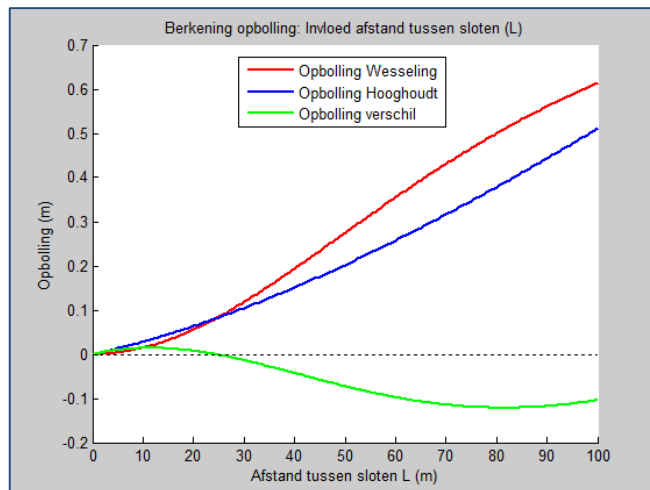
De resultaten vallen te verklaren aan de hand van de volgende feiten. Bij de formule van Hooghoudt heeft de dikte van het freatisch waterpakket sterke invloed op de equivalente diepte. Wanneer de dikte heel erg groot wordt, zal er een effect in de berekening van de equivalente diepte ontstaan. Dit effect resulteert in steeds kleinere equivalente diepte. Hierdoor verkleint de opbolling met steeds kleinere maten en uiteindelijk wordt ongeveer een constant niveau van opbolling bereikt. Voor de formule van Wesseling geldt dat de kwel naarmate de dikte groter wordt een steeds grotere afstand moet afleggen, voordat het een opbolling kan gaan veroorzaken. Niet alle druppels kwel zullen op een gegeven moment nog bij het freatisch waterpeil aankomen en de opbolling neemt dus geleidelijk af.

3.3.2 Afstand tussen de sloten (L)

Voor de parameter van de afstand tussen de sloten is gekozen voor een interval van 5 meter tot en met 100 meter. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 10 op de volgende pagina en de volgende punten zijn daar op aan te merken:

- Beide formules starten bij een opbolling van 0 meter, want bij een afstand tussen de sloten van 0 meter kan geen opbolling plaatvinden.
- Beide formules genereren een grotere opbolling naarmate de afstand tussen de sloten groter wordt.
- De formule van Hooghoudt genereert na een afstand van 27,5 meter tussen de sloten altijd een grotere opbolling. Het verschil loopt op van 10 centimeter bij $L = 50$ meter tot 14 centimeter bij $L = 80$ meter. Vanaf $L = 80$ meter verkleint het verschil weer.

De verklaring voor een steeds hoger liggende opbolling ligt in het feit dat bij de formule van Hooghoudt de druppels die in het midden infiltreren er langer over doen om de sloot te bereiken. Er blijft dus meer water gedurende een langere tijd in de opbolling hangen en het maximum zal hoger worden. Bij de formule van Wesseling werkt hetzelfde principe, alleen dan met een aanvoer van onderaf die er langer over doet om naar de zijkanten te stromen en dus een grotere opstuwing in het midden veroorzaakt. Deze opstuwing genereert een hogere opbolling. Het verschil wat tussen de formules ontstaat wordt veroorzaakt, doordat de formule van Hooghoudt gebruik maakt van 2 doorlatendheden en de formule van Wesseling gebruik maakt van 1 gemiddelde doorlatendheid. Dit is besproken in Paragraaf 2.2.6 en 2.4.3.

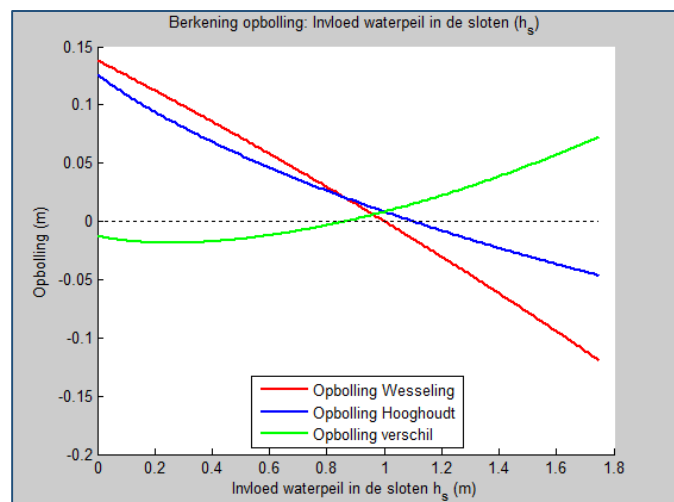


Figuur 10: Invloed afstand tussen de sloten (L)

3.3.3 Waterpeil in de sloten (h_s)

Bij het waterpeil in de sloten is een interval van 0 meter tot 1,75 meter toegepast. Dit betreft dus een interval van een lege sloot naar een volledig gevulde sloot. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 11 en hier valt de volgende informatie uit te halen:

- Beide formules geven een daling van de opbolling gedurende het interval.
- Het verschil tussen de formules ligt bij een waterpeil van 0 meter tot 1 meter is klein. Ongeveer een verschil van maximaal 2 centimeter wordt bereikt.
- Bij een waterpeil van meer dan 1 meter loopt het verschil in uitkomst op tot ongeveer 8 centimeter, doordat de formule van Hooghoudt minder snel gaat dalen gedurende het einde van het interval.



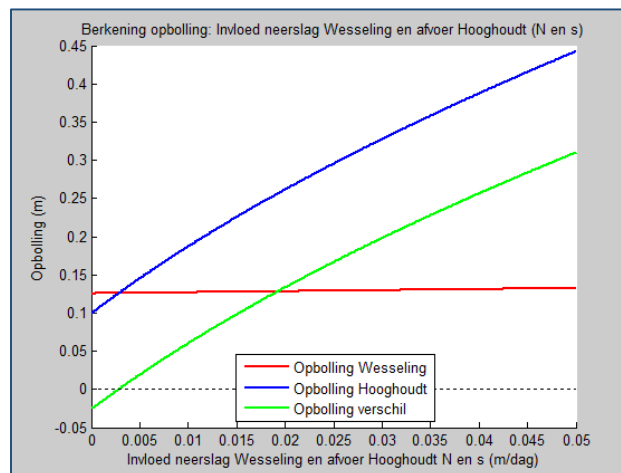
Figuur 11: Invloed waterpeil in de sloten (h_s)

De gevoeligheid valt als volgt te verklaren. Wederom heeft het te maken met de manier van rekening houden met de afvoer. Doordat de formule Wesseling vooral naar de aanvoer vanaf onder de scheidende laag kijkt, zal het water enkel een verdere afstand door het water af moeten leggen in plaats van door droge grond, maar heeft dit ook invloed op het verschil in stijghoogte. Een hogere freatische grondwaterstand zorgt voor een lager verschil in stijghoogte, uiteindelijk een negatieve stijghoogte, en dit verklaart de sterke daling van de opbolling. Doordat gebruik wordt gemaakt van de kwelaanvulling bij de formule van Hooghoudt vindt de daling in de opbolling ook bij de formule van Hooghoudt plaats. Bij de formule van Hooghoudt verkleint de afstand tot het freatisch waterpeil door een ophoging van het waterpeil. Hierdoor bereikt het geïnfilterde water van bovenaf sneller dit waterpeil en zal het, naarmate het minder afstand hoeft af te leggen, sneller weg kunnen stromen naar de sloten. Hierdoor valt deze opbolling lager uit aan het einde van het interval. Bij een negatief interval valt Hooghoudt dus hoger uit.

3.3.4 Neerslag Wesseling in combinatie met de afvoer bij Hooghoudt (N en s)

Voor de neerslag is gekozen voor een interval van 0,001 meter per dag tot 0,050 meter per dag. Zoals wordt uitgelegd in de Paragraaf 3.2 “Analyse met kwel- en neerslagsituaties” betreft de keuze van het maximum een piekneerslag die zich kan voordoen in Nederland (KNMI, Regensintensiteit, 2014). In Figuur 12 zijn de volgende waarnemingen gedaan:

- De formule van Hooghoudt reageert sterker op een intensievere neerslag dan de formule van Wesseling. De formule van Wesseling heeft gedurende het interval een opbolling van 12 centimeter tot ongeveer 13,5 centimeter, waar de formule van Hooghoudt een opbolling heeft van 11 centimeter tot ongeveer 44 centimeter.
- Gedurende bijna het complete interval is de opbolling door formule van Hooghoudt groter. Tot een neerslag van 0,003 meter per dag valt de opbolling bij de formule van Hooghoudt lager uit.



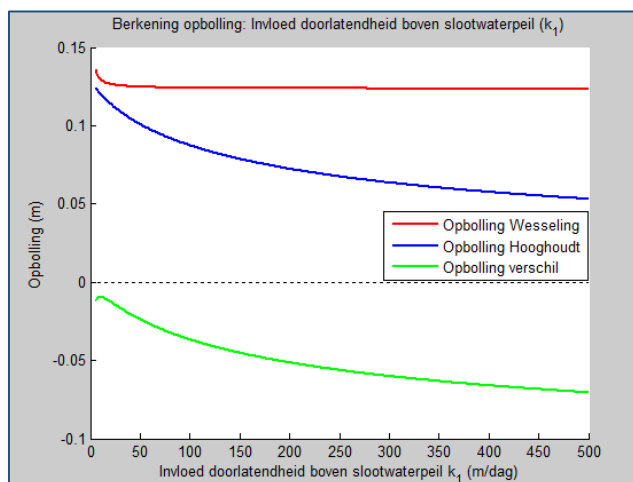
Figuur 12: Invloed neerslag Wesseling en afvoer Hooghoudt (N en s)

Dit verschijnsel is al verklaard in de Paragraaf 3.2.1, “Resultaten”, waar verklaard wordt dat de formule van Wesseling de neerslag meeneemt als een compensatie in de stijghoogte. Hierdoor ontstaat er maar een kleine verandering in de opbolling en treft men een groot verschil aan in vergelijking tot de formule van Hooghoudt. Daarnaast beginnen beide formules bij 0 millimeter neerslag niet op 0 centimeter opbolling, omdat de kwel bij beide formules nog voor een opbolling zorgt. In het geval van de formule van Hooghoudt zorgt de kwelcompensatie voor het meenemen van deze kwel.

3.3.5 Doorlatendheid boven het slootwaterpeil (k_1)

Bij de doorlatendheid boven het slootwaterpeil is gekozen voor het interval 5 meter per dag tot 500 meter per dag. Omdat deze doorlatendheid voor op het gebied van de wegfundering zal liggen mag uitgegaan worden dat deze sterk doorlatend kan zijn. Daarom is een heel extreem maximum gekozen om te kijken hoe de formules hier op reageren. In Figuur 13 zijn de resultaten weergegeven en het volgende is waargenomen:

- De formule van Hooghoudt ondervindt veel invloed van deze parameter, waar de formule van Wesseling niet veel invloed ondervindt.
- Hoe hoger de doorlatendheid is, hoe kleiner de opbolling bij beide formules. Bij de formule van Wesseling is dat nauwelijks waarneembaar in de grafiek van Figuur 13, maar er vindt een minimaal verschil plaats.



Figuur 13: Invloed doorlatendheid boven slootwaterpeil (k_1)

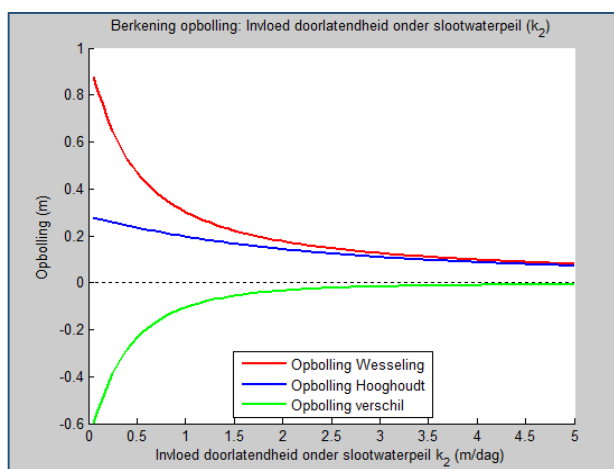
- De formule van Hooghoudt geeft gedurende het complete interval een lagere opbolling als de formule van Wesseling. Aan het begin van het interval liggen de waarden voor de opbolling echter wel redelijk dicht bij elkaar, waarna het verschil gedurende het verloop van het interval steeds groter wordt.

Wederom speelt het feit dat de formule van Hooghoudt de aanvoer van bovenaf bekijkt en de formule van Wesseling deze van onderaf bekijkt een heel grote rol. Bij de formule van Hooghoudt moet deze afvoer namelijk als eerste door deze laag heen en wanneer de doorlatendheid klein is duurt het lang voordat het water afstroomt naar de sloten. De opbolling valt dus hoger uit. Hoe beter de doorlatendheid hoe sneller er afvoer naar de sloten plaatsvindt en hoe lager dus de opbolling. Dit valt goed te zien in Figuur 13. De formule van Wesseling heeft alleen te maken met deze laag wanneer de opbolling ten behoeve van de kwel zijn weg naar de oppervlakte moet vinden. Vandaar bij een lage doorlatendheid een kleine moeilijk waarneembaar piek, die verklaard dat een lage doorlatendheid wel degelijk invloed heeft op de opbolling bij Wesseling.

3.3.6 Doorlatendheid onder het slootwaterpeil (k_2)

Onder het slootwaterpeil bevindt zich de natuurlijke ondergrond. Hier kan dus uitgegaan worden van een zandlaag of een laag met ziltige ondergrond. Er is daarom gekozen voor een maximum aan doorlatendheid van 5 meter per dag en een extreem minimum van 0,05 meter per dag. Uit Figuur 14 volgen de volgende resultaten:

- Beide formules genereren naarmate de doorlatendheid groter wordt een kleinere opbolling. De formule van Wesseling genereert wel een hogere opbolling aan het begin van het interval en daalt vervolgens ook sneller.
- Het verschil in opbolling gedurende het interval is groter bij de formule van Wesseling, waar het uiteenloopt van 88 centimeter bij $k_2 = 0,01$ meter per dag en ongeveer 10 centimeter bij $k_2 = 5$ meter per dag. Bij de formule van Hooghoudt is dit respectievelijk 30 centimeter en 41 centimeter.
- Naarmate het einde van het interval bereikt wordt, is het verschil steeds kleiner. Aan het eind van het interval zijn de uitkomsten voor de opbolling van beide formules nagenoeg gelijk.



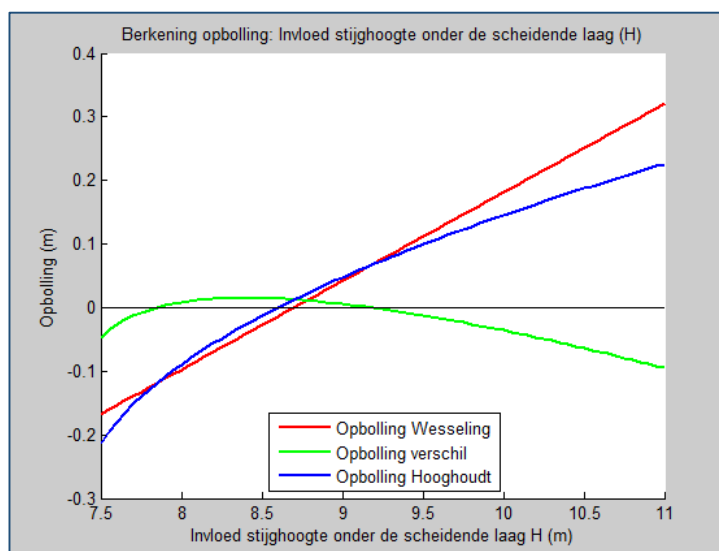
Figuur 14: Invloed doorlatendheid onder slootwaterpeil (k_2)

De verklaring komt sterk overeen met die van de parameter k_1 . Echter betreft dit geval de doorlatendheid van de grondlaag onder het slootwaterpeil, dus resulteert dit in een ander effect. De formule van Hooghoudt ondervindt nu namelijk een kleiner effect in opbolling, doordat het water hier alleen in het geval van radiale kwel doorheen hoeft te stromen. Aan de zijkanten van de sloot kan het water namelijk sneller wegstromen richting de sloten dan in het midden. Dit verklaart waarom de opbolling aan het einde, gedurende het interval, steeds minder snel daalt. Bij een hele lage doorlatendheid wordt een vergroting van de opbolling bij de formule van Hooghoudt verklaard, doordat het water geen mogelijkheid heeft om snel genoeg weg te stromen. Het grondwater blijft dan hangen op deze grondlaag met een lage doorlatendheid. Bij de formule van Wesseling zal een lage doorlatendheid ervoor zorgen dat de afstroming naar de sloten minder snel plaatsvindt en de opbolling groter kan worden door het opstuwende water. Bij een betere doorlatendheid doet zich het omgekeerde effect voor en dus resulteert dit in een kleinere opbolling.

3.3.7 Stijghoogte onder de scheidende laag (H)

Het kiezen van het interval van de stijghoogte is zo gekozen, dat er ook een negatieve stijghoogte aanwezig is. Daarnaast is een extreme stijghoogte gekozen als maximum om te kijken naar de reactie van de formules bij een grote hoeveelheid kwel. Het interval ligt van 7,5 meter tot 11 meter stijghoogte onder de scheidende laag. Het freatisch waterpeil is 8,7 meter dus dat levert een minimaal stijghoogteverschil op van -1,2 meter en een maximum stijghoogteverschil van 2,3 meter. Dit interval geeft de volgende resultaten weergegeven in Figuur 15 en daaruit volgen de volgende waarnemingen:

- Bij een stijghoogte van 7,8 meter t/m 9,2 meter is het verschil tussen de formules klein. Vanaf een stijghoogte van 9,2 meter neemt dit verschil geleidelijk toe, waarbij de uitkomst van de formule van Wesseling hoger ligt. De opbolling neemt bij de formule van Wesseling gedurende het gehele interval ongeveer constant toe, waar bij de formule van Hooghoudt de opbolling gedurende het interval geleidelijk minder snel toeneemt.
- Wanneer de stijghoogte zorgt voor een negatief stijghoogteverschil geeft de formule van Wesseling een negatieve opbolling. De formule van Hooghoudt zorgt pas bij een stijghoogteverschil groter dan -0,1 meter voor een negatieve opbolling.
- Naarmate de stijghoogte groter wordt, wordt bij beide formules de opbolling ook groter.



Figuur 15: Invloed stijghoogte onder de scheidende laag (H)

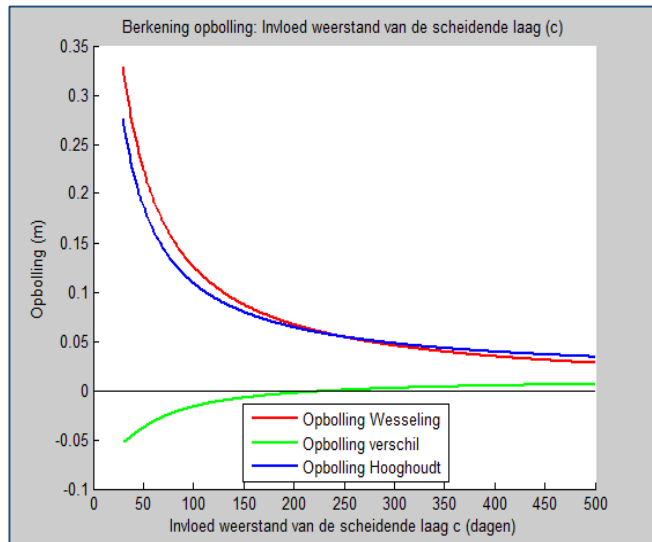
De resultaten vallen eenvoudig te verklaren. In de formule van Hooghoudt wordt de kwel omgerekend tot een kwelaanvulling en deze aanvoer wordt als een neerslag toegevoegd. Een groter stijghoogteverschil en dus een grotere kwel zorgt voor een grotere opbolling. Hetzelfde geldt voor de formule van Wesseling: hoe groter de stijghoogte, hoe groter de kwel. Als het stijghoogteverschil negatief is, wordt bij de formule van Wesseling een negatieve opbolling gemeten, doordat er wegzijging, infiltratie door de scheidende laag, plaatsvindt. Bij de formule van Hooghoudt treedt, voordat een positief stijghoogteverschil bereikt wordt, al een opbolling op. Dit wordt veroorzaakt, doordat een deel van de negatieve stijghoogte, welke zorgt voor een negatieve opbolling, gecompenseerd wordt door de positieve opbolling van de neerslag. Bij de formule van Wesseling treedt dit verschijnsel ook op alleen valt dit niet uit de grafiek waar te nemen.

3.3.8 Weerstand van de scheidende laag (c)

Een interval van 30 dagen tot 500 dagen is voor de weerstand van de scheidende laag gekozen. Er is gekozen voor een lage waarde als minimum en een boven gemiddelde waarde voor de weerstand van de scheidende laag gezien de meetlocatie als maximale waarde, zodat de belangrijkste situaties meegenomen worden in de waarnemingen. De resultaten zijn gegeven in Figuur 16 en de bijbehorende waarnemingen zijn als volgt:

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

- De formules hebben gedurende het complete interval redelijk gelijke uitkomsten voor de opbolling. Aan het begin van het interval vindt er nog wel een verschil van ongeveer 5 centimeter plaats. Vervolgens ligt het verschil vanaf een weerstand van 150 dagen binnen 1 centimeter
- Gedurende het groter worden van de weerstand van de scheidende laag verkleint de opbolling bij beide ongeveer in gelijke mate en een gelijke waarde voor de opbolling wordt bereikt rond een weerstand van 230 dagen. Vanaf deze weerstand van 230 dagen loopt het verschil weer erg langzaam op.



Figuur 16: Invloed weerstand van de scheidende laag (c)

De verklaring is vrij eenvoudig. Bij de formule van Wesseling geeft een grotere weerstand van de scheidende laag minder mogelijkheid voor het water om naar het freatisch waterpakket te stromen. Dit zorgt voor een vertraging van de kwelstroom, naarmate de weerstand groter wordt. Hierdoor is gedurende het interval een steeds kleinere opbolling mogelijk. Bij de formule van Hooghoudt geldt hetzelfde. Doordat in de kwelaanvulling die op Hooghoudt toegepast wordt als aanvoer gebruik wordt gemaakt van de parameter c , zal de kwelaanvulling naarmate de weerstand van de scheidende laag groter wordt verkleinen en de opbolling lager uitvallen. Het kleine verschil wat nog plaats vindt kan vervolgens verklaard worden door het verschil in de invloed die de neerslag uitvoert en een onnauwkeurigheid in het bepalen van de kwelaanvulling.

3.3.9 Conclusie

Door middel van het opzetten van een verandering gedurende een gekozen interval per parameter zijn verscheidene waarnemingen gedaan. Aan de hand van deze waargenomen verschillen in de parameteranalyse kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- *Uit de resultaten volgt, zoals ook al tijdens de parameterstudie in Hoofdstuk 2 en in Paragraaf 3.2.2, dat de formule van Hooghoudt zich volledig focust op de aanvoer van boven en de formule van Wesseling zich voornamelijk focust op de kwel van onder. Deze bevestiging wordt vooral gevonden in de Paragrafen 3.3.5 en 3.3.6. De formule van Wesseling is hier erg gevoelig voor k_2 (Figuur 14), welke de onderste laag van het freatisch waterpakket betreft en de formule van Hooghoudt is daarentegen erg gevoelig voor k_1 (Figuur 13), welke de bovenste laag van het freatisch pakket betreft.*
- *Er kan geconcludeerd worden dat de formule van Wesseling te weinig aandacht besteedt aan het benaderen van de neerslag. De formule van Hooghoudt benaderd deze neerslag vele malen beter. De resultaten van de Paragrafen 3.3.4 en 3.3.7 met respectievelijk Figuren 12 en 15 bevestigen het meenemen van de neerslag in de formule van Wesseling, maar er wordt erg weinig aandacht besteedt aan het benaderen van deze neerslag door de kleine invloed die de resultaten tonen.*

- *De formule van Hooghoudt benaderd de kwel in relatie tot de formule van Wesseling ook inclusief een kwelaanvulling nog niet op een correcte manier. Wel volgt uit de resultaten, dat een nauwkeurige kwelaanvulling, op locaties met kwel, noodzakelijk zal zijn voor het bepalen van de opbolling met de formule van Hooghoudt.* Het verschil in uitkomsten tussen de Figuren 15 en 16, Paragraaf 3.3.8 en de eenvoudige methode voor het bepalen van de kwelaanvulling vanuit Formule 3.2 tonen een incorrecte toepassing, maar wel een noodzakelijkheid voor het gebruik van een kwelaanvulling aan.
- *De verschillende benadering van de doorlatendheden in de formules zorgen voor een onnauwkeurigheid in de resulterende opbolling bij beide formules.* Uit de resultaten van de parameterstudie uit Hoofdstuk 2 werd al duidelijk, dat de formules de doorlatendheid op een verschillende manier benaderen. Vervolgens volgt uit de resultaten van Paragraaf 3.3.2 met Figuur 10, dat er sprake is van een onnauwkeurigheid in de formule van Hooghoudt betreffende de doorlatendheden en nog een extra onnauwkeurigheid, ten opzichte van Hooghoudt (1940), in de benadering van de doorlatendheid bij de formule van Wesseling welke vermoedelijk ook wordt veroorzaakt door het toepassen van de middeling uit Paragraaf 3.1.2.

4 Toetsing aan veldmetingen

Dit hoofdstuk bestaat uit twee onderdelen. De eigen veldmetingen en de toetsing aan de hand van de gegevens uit het onderzoek van Damveld (2013). Gedurende het verloop van dit hoofdstuk wordt duidelijk, waarom gebruik gemaakt is van de gegevens uit het onderzoek van Damveld (2013).

4.1 Eigen veldmetingen

Voor een toetsing aan de veldmetingen zijn meerdere factoren belangrijk om tot goede metingen te komen. Voor het uitvoeren en plaatsen van de metingen zijn verscheidene onderdelen belangrijk. De volgende onderdelen, welke geregeld en opgezet moeten worden voor het uitvoeren van de metingen, zullen in dit hoofdstuk stuk voor stuk behandeld gaan worden. Deze onderdelen betreffen de meetlocatie, meetopstelling en het verzamelen van de omgevingsgegevens.

4.1.1 Meetlocatie

In het onderzoek is het van groot belang dat de meetlocatie die gebruikt wordt geschikt is voor het onderzoek. Hiervoor zijn er een aantal eisen waar de meetlocatie aan moet voldoen, voordat gezegd kan worden dat de meetlocatie geschikt is. Omdat er gekeken wordt naar de opbolling van het grondwater onder de wegverharding stroomt de aanvoer van boven via het wegooppervlak groot en deels naar de sloten. De aanvoer van boven wordt dus geminimaliseerd en het water infiltreert via de sloten in de ondergrond. Om de validatie van deze eis te kunnen waarborgen wordt gezocht naar een situatie met een minimalisatie van deze aanvoer van boven en dus een zo groot mogelijke wegverharding tussen de twee sloten.

Daarnaast is, zoals uitgelegd in de inleiding, in het onderzoek van Damveld (2013) geconcludeerd, dat de kwel een invloed kan hebben op de opbolling. Het is dus van belang dat op de locatie kwel aanwezig is, welke bepaald kan worden, of er moet totaal geen kwel aanwezig zijn. Daardoor kan de kwel juist meegenomen worden in het onderzoek en wordt voorkomen dat het een onzekere factor is. Het voornaamste doel van de eigen metingen is de invloed van deze kwel onderzoeken op de opbolling. Een goed voorbeeld van de te onderzoeken situaties zijn de situaties met enkel kwel uit Tabel 2 en Tabel 3. Deze tabellen staan gegeven in Paragraaf 3.2. Dit betreffen de situaties: alleen kleine kwel, alleen middelmatige kwel en alleen grote kwel. De volgende eisen voor de meetlocatie kunnen opgesteld worden:

1. Er moet een groot oppervlak met wegverharding aanwezig zijn.
2. Aan beide zijden van de wegverharding moet een sloot, rivier of kanaal met oppervlaktewater aanwezig zijn.
3. In de ondergrond moet een bepaalbare of anders geen kwel aanwezig zijn.

Naast deze strenge eisen geeft het rapport van Bouma, Maasbommel & Schuurman (2012) nog de volgende aandachtspunten bij het bepalen van een meetlocatie voor het plaatsen van peilbuizen:

- Locatieselectie op basis van ruimtelijke variatie van grondwaterstanden
- Hoogteligging
- Watergangen
- Grondwateronttrekkingen
- Verharding
- Verdamping
- Drainage en lokale aanvoer
- Terugvindbaarheid
- Bereikbaarheid en veiligheid

Als niet goed rekening gehouden wordt met deze eisen, oefent dit een invloed uit op de metingen en ontstaan meetfouten. In het geval van de aanwezigheid van een meetfout in de veldmetingen is het mogelijk dat dit uitloopt tot een scenario, waarin de veldmetingen als onbetrouwbaar verklaard worden. De aandachtspunten en eisen zoals beschreven zullen allen behandeld worden bij de keuze van de meetlocatie in Paragraaf 4.1.2 “Meetopstelling”.

In Bijlage A.2 is het onderzoek naar de meest geschikte meetlocatie gegeven. De algemene conclusies die getrokken kan worden uit zijn dat meetlocatie nummer 3 op het adres Kanaal Noord 350 een geschikte locatie is om de metingen voor het onderzoek uit te voeren (Figuur 17). De gehele locatiebeschrijvingen met gebiedseigenschappen is gegeven in Bijlage A “Locatiebeschrijving”. Hieruit volgt, dat er wel kwel aanwezig is en het mogelijk is om deze kwel te bepalen aan de hand van de gegevens in de peilbuis van het Waterschap uit Bijlage A.2.2. In het bodemonderzoek uit Bijlage A.3 zijn grafieken gegeven met het verloop van de stijghoogtes. Uit deze grafieken valt het stijghoogteverschil te bepalen, waarna deze resultaten ingevuld kunnen worden in de formules. Hierdoor kan de doelstelling om uit de eigen metingen de invloed van kwel, zoals zojuist verklaart uit de situaties van Tabel 2 en Tabel 3 in Paragraaf 3.2, te bepalen goed uitgevoerd gaan worden in combinatie met deze meetlocatie.

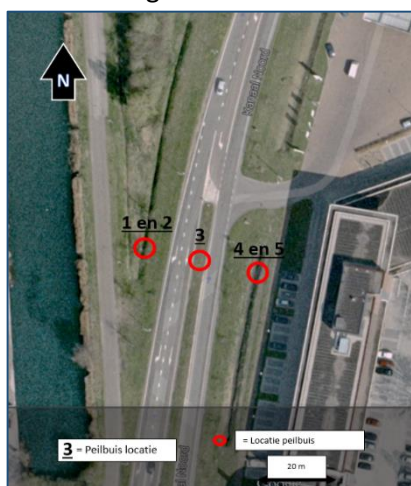


Figuur 17: Meetlocatie Kanaal Noord te Apeldoorn

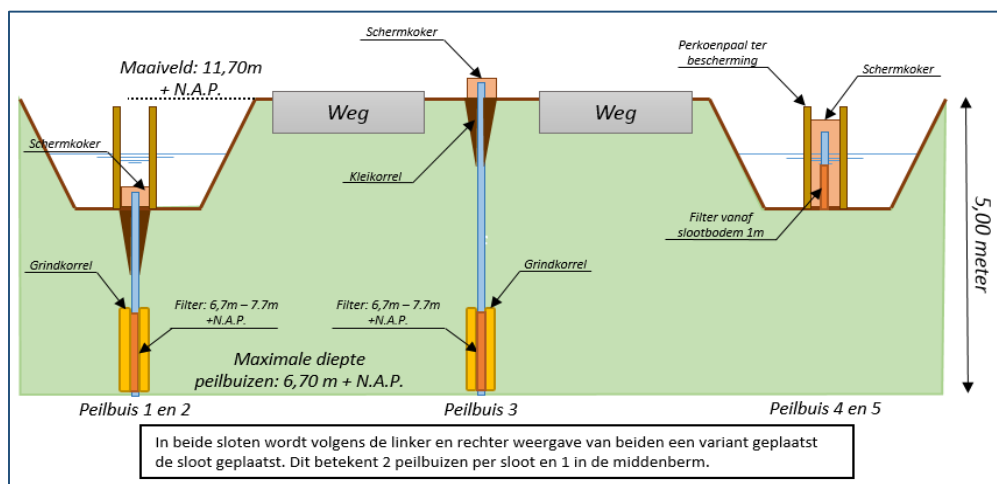
4.1.2 Meetopstelling

Wanneer de meetlocatie bekend is, kan gestart worden met het maken van de meetopstelling. Ten eerste moeten de locaties van de peilbuizen gekozen worden. Daarbij moet rekening worden gehouden met de aandachtspunten uit het rapport van Bouma, Maasbommel, & Schuurman (2012) en met de verkeerssituatie. In Bijlage B.2 zijn deze aandachtspunten uitgewerkt voor de meetlocatie op de Kanaal Noord. Bijlage A.4 beschrijft de verkeermaatregel die benodigd is om de peilbuisplaatsing uit te kunnen voeren.

Vervolgens is een keuze gemaakt voor de locaties van de peilbuizen weergegeven in Figuur 18. Er zijn vijf peilbuizen benodigd voor het uitvoeren van de metingen. Daarvan staat er één in de middenberm van de weg en in beide sloten staan twee peilbuizen. In de sloten is gekozen voor twee peilbuizen, omdat de sloten veelal droog staan. Één peilbuis meet de waterstand van het grondwater en de andere peilbuis de eventuele slootwaterstand. Een doorsnede van de meetopstelling is weergegeven in Figuur 19. In Bijlage B.3 is de meetopstelling met zijn kenmerken en benodigheden uitgebreid toegelicht.



Figuur 18: Locaties peilbuizen



Figuur 19: Meetopstelling peilbuizen

4.1.3 Omgevingsgegevens

Naast de gegevens die verzameld worden aan de hand van de peilbuizen zijn er ook nog gegevens uit de omgeving nodig. De volgende gegevens zijn benodigd en op de volgende manier beschikbaar:

- Neerslaggegevens
 - o Voor de neerslaggegevens kan betreffende de gevonden meetlocatie een aanvraag gedaan worden bij het waterschap Vallei en Veluwe. Hier zijn de neerslagradar gegevens per vierkante kilometer beschikbaar. Er kan contact gelegd worden met Marinus van Dijk, werkzaam bij het waterschap Vallei en Veluwe.
- Bodemgegevens
 - o De bodemgegevens zijn beschikbaar via DINOloket en voor deze locatie beschikbaar in het bodemonderzoek uit Bijlage A.3. Ook is het van belang dat tijdens de plaatsing van de peilbuizen een boorprofiel wordt gemaakt.
- Doorlatendheden
 - o De doorlatendheid gegevens moeten op locatie worden geschat aan de hand van de boormonsters die gemaakt worden. Vervolgens zal een expert moeten worden gezocht die met de grondmonsters een schatting van de doorlatendheid kan maken.
- Afmetingen op de meetlocatie
 - o Hiervoor zal de meetlocatie bezocht moeten worden en met een meetlint de benodigde afstanden gemeten moeten worden. Voor de hoogten zal gebruik worden gemaakt van het inmeten van de N.A.P. hoogten. In Bijlage B.4 en B.5 zijn de benodigde meetpunten en meetmethoden beschreven
- Stijghoogtes
 - o Wanneer de stijghoogten bepaald moeten worden kan het zijn dat een peilbuis onder de scheidende laag benodigd is. In dit geval was er een peilbuis van het waterschap aanwezig. Hiermee zijn deze stijghoogten bepaald.

4.1.4 Uitvoeringsproblemen veldmetingen

Tijdens het onderzoek is verschillende keren tegen een probleem aangelopen voor het uitvoeren van de veldmetingen. Nadat, na afkeuring van de verkeerssituatie, de verkeersafzetting geregeld was, is naar de locatie toegegaan om de peilbuizen te plaatsen. Echter is bij het plaatsen van de peilbuis in de middenberm op een onvoorziene dikke betonlaag van 50 tot 70 centimeter in de middenberm van de weg gestuit. Dit was vooraf niet bekend gemaakt en heeft ervoor gezorgd, dat op de gekozen meetlocatie in Apeldoorn de metingen niet door konden gaan. Er is onvoldoende tijd geweest voor het onderzoek om de meting later alsnog uit te voeren. Daarnaast was er een beperkt budget aanwezig, waardoor een boring in de middenberm met afzetting te duur was. Aangezien alle onderdelen voor goede en betrouwbare metingen uitgewerkt zijn is de meetmethode met zijn locatie zeer geschikt om in een vervolgonderzoek gebruikt te worden. Helemaal nu bekend is dat via de middenberm niet of nauwelijks water kan infiltreren. De meetmethode in het verslag is geschikt als handleiding voor een onderzoek met veldmetingen op deze locatie.

Wegens het schrappen van de veldmetingen op de locatie te Apeldoorn is gezocht naar een snelle oplossing om een toetsing aan veldmetingen uit te kunnen voeren. In het onderzoek van Damveld (2013) zijn metingen uitgevoerd voor het bepalen van de nauwkeurigheid van de formule van Hooghoudt. Na het verzamelen en analyseren van de datagegevens is bepaald dat deze gegevens gebruikt kunnen worden in het onderzoek. Omdat uit de literatuur geen datagegevens gevonden zijn is gekozen om aan de hand van de meet- en omgevingsgegevens uit het onderzoek van Damveld (2013) een toetsing aan de veldmetingen uit te voeren. Dit betreft namelijk ook een oplossing, waarbij nog binnen het tijdsbestek van het onderzoek, het onderzoek afgerond kan worden.

Daarnaast is ter compensatie van het mislopen van de metingen op de uiterst geschikte locatie in Apeldoorn een uitgebreide theoretische studie uitgevoerd, welke terug te vinden is in Hoofdstuk 3. Doordat de meetlocatie in Apeldoorn zeer geschikt is, is deze meetlocatie hiervoor als uitgangspunt genomen. Uit de uitgevoerde theoretische analyse volgen een aantal belangrijke conclusies, welke terug te vinden onder het kopje “Hoofdvraag 1” van Hoofdstuk 6 “Conclusie”.

4.2 Toetsing aan de veldmetingen met Damveld (2013)

Zoals genoemd is wegens het mislukken van de veldmetingen gekozen om verder te werken met de meetgegevens horend bij het onderzoek van Damveld (2013). In deze paragraaf is dan ook, aan de hand van het onderzoek van Damveld (2013), de toetsing aan de veldmetingen en het verzamelen van de nog onbekende data bij dat onderzoek uitgevoerd.

4.2.1 Projectlocatie

De projectlocatie welke door Damveld (2013) gebruikt is ligt nabij Rijssen, in de Gemeente Wierden. In Figuur 20 zijn de exacte locaties voor peilbuisplaatsing weergegeven. Er zullen twee locaties van Damveld (2013) gebruikt worden voor een toetsing aan de veldmetingen. Dit betreffen Locatie 1 en Locatie 3. Locatie 5 is ongeschikt aangezien hier geen verharding aanwezig is.

Damveld (2013) verklaard over Locatie 4 dat er te maken is geweest met defecte meetapparatuur, waardoor de data van deze locatie



Figuur 20: Meetlocatie Damveld (2013) met exacte locaties peilbuizen (Google Earth, 2015)

niet als betrouwbaar gesteld kan worden. De divers hebben op locatie 4 door het defect geen juiste grondwaterstand gemeten. De betrouwbaarheid van de metingen bij de Locaties 1 en 3 worden gerechtvaardigd door een analoge meting welke tijdens het onderzoek van Damveld (2013) is uitgevoerd en doordat de apparatuur voor de start van de metingen geijkt is. De apparatuur is dus op elkaar afgesteld en vervolgens nog tijdens de metingen gecontroleerd. Doordat bij Locatie 2 de afwijking bij het afstellen erg groot was is deze locatie niet meegenomen in het onderzoek. Er kan daardoor namelijk niet gegarandeerd worden dat deze locatie betrouwbare veldmetingen bevat. De afstelling en controle van de meetapparatuur vallen terug te vinden in Bijlage 4.4 uit het onderzoek van Damveld (2013).

4.2.2 Omgevingsgegevens op de projectlocatie

Voor de Locaties 1 en 3 geldt dat deze verschillende eigenschappen bevatten. In deze paragraaf zullen alle benodigde gegevens op een rij gezet worden, zodat de formules in de theorie op vergelijkbare wijze ingevuld kan worden. De gegevens zullen in eerste instantie uit het onderzoek van Damveld (2013) gehaald worden. Daarna zal bekeken worden welke gegevens nog ontbreken en zullen deze vanuit de literatuur bepaald of geschat worden. In Tabel 4 zijn de gegevens betreffende de breedtes en dieptes op de locatie gegeven en in Tabel 5 zijn de gegevens betreffende doorlatendheden en weerstand van de scheidende laag gegeven.

Locatie	Slootafstand (m)	Slootbreedte (m)	Talud sloot (graden)	Waterdiepte (m)
1	42	1	45	0,10
3	28	0,5	45	0,10

Tabel 4: Parameterwaarden breedtes en dieptes locatie 1 en 3

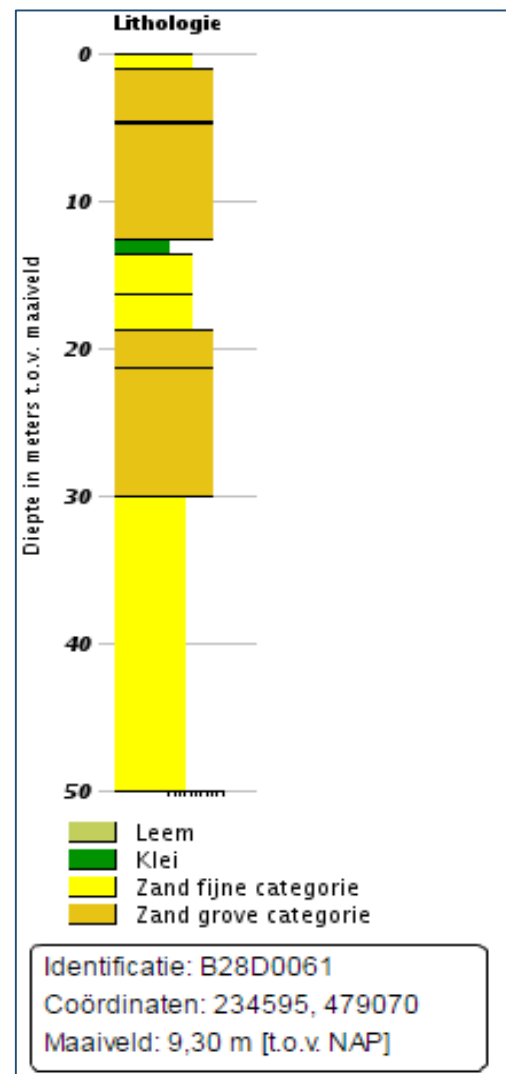
Locatie	Doorlatendheid boven slootwaterpeil (m/dag)	Doorlatendheid onder slootwaterpeil (m/dag)	Weestand van de scheidende laag (dagen)
1	1	1,2	27
3	1	1,2	27

Tabel 5: Parameterwaarden doorlatendheden en weerstanden locatie 1 en 3

Scheidende laag

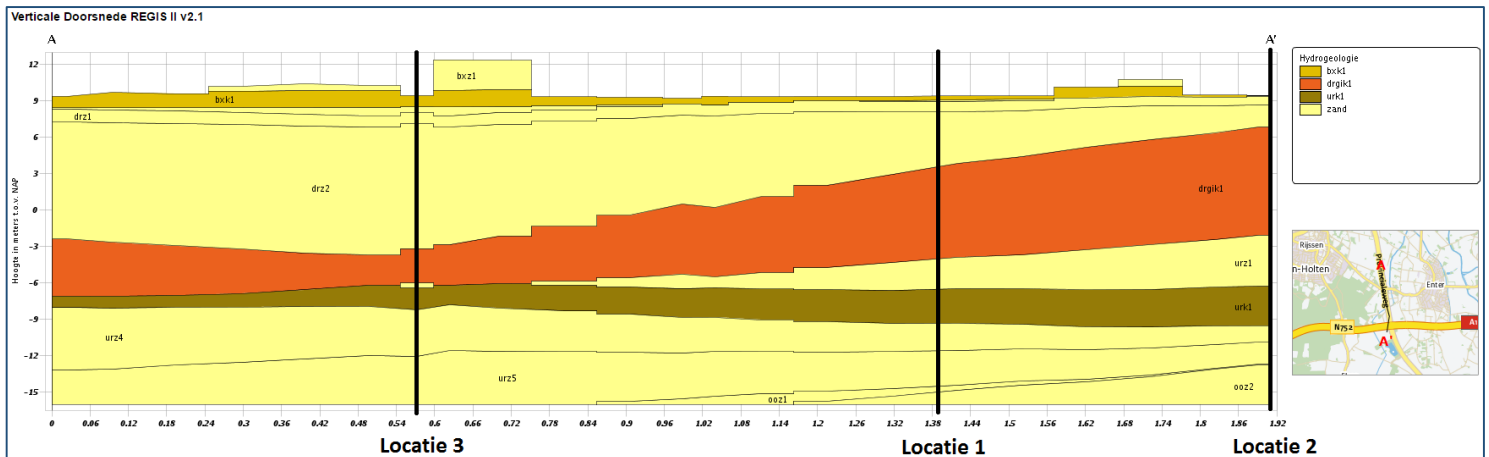
In het onderzoek van Damveld (2013) is tijdens het onderzoek een boorprofiel gemaakt van de ondergrond. Hierbij is de scheidende laag niet gevonden en is gebruik gemaakt van een grote onzekerheid in de diepte van de scheidende laag. Damveld (2013) verklaart dat er enkel tot een diepte van 6 meter geboord is, waar verwacht werd dat de scheidende laag op een diepte van 4,5 meter aangetroffen zou worden. Deze boring heeft plaatsgevonden op Locatie 2, weergegeven in Figuur 20. Figuur 22 geeft een bodemprofiel langs alle meetlocaties afkomstig van DINOloket (2015). Uit de boring van Damveld (2013) kan dus geconstateerd worden dat de grondlaag met een oranje kleur in Figuur 22 geen laag betreft die als scheidend beschouwd kan worden. Deze laag wordt echter door DINOloket (2015) wel beschouwd als eerste kleiige eenheid en betreft het laagpakket van Gieten.

In Figuur 22 is echter nog een scheidende laag te zien aangegeven met de bruine kleur. Dit betreft een onderdeel van de formatie van Urk en wordt als een kleiige eenheid beschouwd. Het bewijs dat deze scheidende laag daadwerkelijk aanwezig is volgt uit een boring, wederom afkomstig vanaf DINOloket, uit 2005 (Figuur 21). Deze recente data weergeeft een kleine kleilaag die zich bevindt op een diepte van 12,50 meter tot 13,50 meter onder het maaiveld. Er zal worden aangenomen dat deze diepte bij alle locatie de diepte van de scheidende laag is, omdat Figuur 22 aantoont dat de scheidende laag zich op een constante diepte bevindt gedurende het gehele gekozen traject.



Figuur 21: Boormonsterprofiel ten hoogte van locatie 3 van Damveld (2013)

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

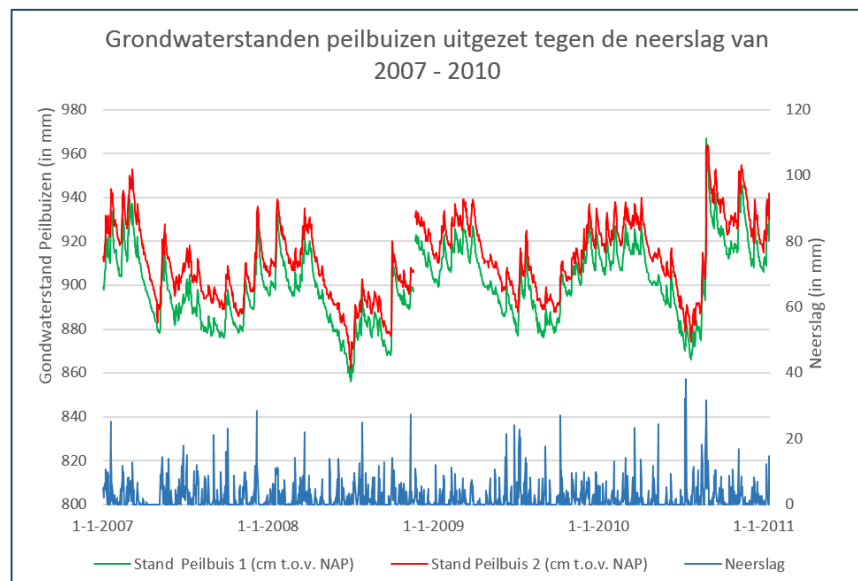


Figuur 22: Doorsnede-profiel bodem locatie Damveld (2013) (DINOloket, 2015)

Kwel

Uit het onderzoek van Damveld (2013) naar de gebiedseigenschappen volgde dat er gedurende het hele jaar een kwel plaatsvindt op de meetlocaties. Echter is geen exacte hoeveelheid kwel berekend om in het onderzoek mee te nemen. Sterker nog, in het gehele onderzoek is geen rekening gehouden met de aanwezige kwel. In de gebiedsbeschrijving geeft Damveld (2013) wel aan de hand van de isohypsen aan dat er stijghoogteverschillen aanwezig zijn tussen de verschillende waterpakketten. Een zo exact mogelijke schatting van het stijghoogteverschil zal gemaakt gaan worden.

In de buurt van de meetlocaties is een waterput aanwezig met beschikbare meetgegevens van januari 1972 tot en met januari 2011. Hier zijn peilbuizen geplaatst met filters in onder andere het freatisch waterpakket en het eerste watervoerend pakket. Met behulp van deze gegevens zal de stijghoogte bepaald worden op de meetlocatie uit het onderzoek van Damveld (2013).



Figuur 23: Resultaten peilbuizen locatie Damveld (2013)

Na een data analyse is een grafiek gemaakt, weergegeven in Figuur 23. Peilbuis 2 ligt in het watervoerend pakket onder de scheidende laag en Peilbuis 1 bevindt zich in het freatisch waterpakket. Uit de grafiek valt dus op te maken dat er bijna een positief stijghoogteverschil is, wat resulteert in kwel. Ook reageren de beiden grondwaterstanden goed op elkaar en op de neerslag, wat verklaart dat er een connectie zit tussen de lagen. Uit de gegevens volgt dat over de gehele tijdsperiode een gemiddelde stijghoogte plaatsvindt van 10,31 centimeter. Doordat er niet of nauwelijks grote uitschieters in het stijghoogteverschil plaatsvinden, is deze kwantificatie gebruikt worden bij het invullen van de formule.

Neerslag

Voor de neerslag zijn gegevens beschikbaar via het KNMI. De periode en locatie waarvan de neerslaggegevens verzameld zijn betreft de locatie Heino. Deze locatie ligt een redelijk stuk van de meetlocatie af, waardoor er een verschil van aankomst in de neerslag zit. Deze is geschat op een uur, aangezien de betreffende neerslag dan wordt herkend in de resultaten van de opbolling. De looptijd van de metingen betrof 33 dagen van 13 maart 2013 tot en met 14 april 2013. Uit de data die verzameld is bij de plaatsing van de peilbuizen met het onderzoek van Damveld (2013) worden de periodes met een duidelijke neerslag gepakt, welke gebruikt worden voor de toetsing. De toetsing vindt gedurende hetzelfde interval in de metingen plaatsvinden als in het onderzoek van Damveld (2013), omdat dit het enige goede moment met een neerslag is in de metingen. De geschikte data betreffen 7 maart 2013 t/m 14 maart 2013. In deze periode is er gedurende deze dagen een neerslag van gemiddeld 2 millimeter per dag gevallen met uitschieters naar 6 millimeter per dag (KNMI, Neerslag, 2015). Voor de neerslag is het gemiddelde van 2 per dag millimeter vastgesteld.

4.2.3 Resultaten

Er is gekeken naar de specifieke opbolling die ten gevolgen van deze neerslag plaatsvindt. In Tabel 6 zijn de belangrijkste resultaten van de veldmetingen weergegeven. In Bijlage D is de complete tabel gegeven met daarin alle data van het gehele interval. In Tabel 6 is enkel het begin en einde van het interval te zien. Hieruit is de specifieke opbolling bepaald door de hoogste opbolling vlak voor de neerslag van de grootste opbolling, voordat er een stevige daling toetreedt, afgehaald. Op deze manier wordt alleen de reactie van de opbolling aan de hand van de daadwerkelijke afvoeren meegenomen.

Vanuit de gegevens van Tabel 6 kan voor Locatie 1 waargenomen worden dat de maximale grondwaterstand in de middenberm na de neerslag 76,5180 centimeter bedraagt op 12 maart om 9 uur in de ochtend. De grondwaterstand betreft voordat de neerslag heeft plaatsgevonden op zijn laagste punt 69,9900 centimeter. Op Locatie 1 vindt dus een specifieke opbolling plaats van $76,5180 - 69,9900 = 6,528$ centimeter.

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
07-04-2013	21:00	70,0920	30,2180
07-04-2013	22:00	70,0920	30,2180
07-04-2013	23:00	70,6020	30,9320
07-04-2013	24:00	69,9900	30,1160
08-04-2013	1:00	70,2960	30,4220
08-04-2013	2:00	70,7040	30,8300
08-04-2013	3:00	70,2960	30,8300
08-04-2013	4:00	70,6020	30,6260
08-04-2013	5:00	69,9900	29,9120
08-04-2013	6:00	70,2960	30,1160
08-04-2013	7:00	70,3980	30,2180
08-04-2013	8:00	70,9080	31,0340
08-04-2013	9:00	70,5000	30,7280
08-04-2013	10:00	70,7040	31,3400
08-04-2013	11:00	71,6220	32,0540
12-04-2013	6:00	76,0080	35,3180
12-04-2013	7:00	75,9060	34,7060
12-04-2013	8:00	76,7220	35,4200
12-04-2013	9:00	76,5180	35,6240
12-04-2013	10:00	76,2120	35,4200
12-04-2013	11:00	75,8040	35,1140
12-04-2013	12:00	75,7020	35,0120
12-04-2013	13:00	75,9060	35,0120
12-04-2013	14:00	75,9060	34,6040
12-04-2013	15:00	76,2120	34,8080

Tabel 6: Meetgegevens voor bepaling specifieke opbolling

Via dezelfde methode is de specifieke opbolling op Locatie 3 bepaald. De maximale waarde na de neerslag betreft 35,6240 centimeter en de minimale waarde voor de neerslag betreft 29,9120 centimeter. Dit geeft voor Locatie 3 een specifieke opbolling van 5,712 centimeter. De betreffende parameters uit de omgeving zijn reeds in dit hoofdstuk bepaald. Met deze parameters zijn de uitkomsten voor de specifieke opbolling vanuit de formules bepaald. Alle bepaalde waarden, inclusief de specifieke opbolling vanuit de veldmetingen, staan gegeven in Tabel 7.

	Specifieke opbolling locatie 1	Specifieke opbolling locatie 3
Veldmetingen	6,528 centimeter	5,712 centimeter
Formule van Wesseling	7,980 centimeter	5,663 centimeter
Formule van Hooghoudt exclusief kwelaanvulling	7,960 centimeter	5,380 centimeter
Formule van Hooghoudt inclusief kwelaanvulling	22,840 centimeter	15,440 centimeter

Tabel 7: Resultaten specifieke opbollingen formules en veldmetingen

Uit de resultaten van Tabel 7 valt het volgende op te merken. Bij Locatie 1 hebben de formule van Wesseling en de formule van Hooghoudt opvallend genoeg een zo goed als gelijke uitkomst in de opbolling. Het verschil is enkel 0,020 centimeter. In verhouding is dit verschil zo klein, dat deze uitkomsten voor de opbolling als gelijk beschouwd kunnen worden. Bij Locatie 3 ligt de uitkomst van de formule van Wesseling dicht bij de uitkomst van de veldmetingen. De uitkomsten voor de opbolling van de formule van Hooghoudt en Wesseling komen echter wel lager uit dan zich in werkelijkheid voordoet. Toch benaderen beide formules de opbolling binnen een afwijking 0,5 centimeter. Tot slot ontstaat bij het toepassen van een kwelaanvulling een groot verschil in opbolling ten opzichte van de werkelijkheid. Uit de resultaten van Tabel 7 volgt dat de opbolling een aantal malen hoger uitvalt dan de opbolling die zich werkelijk voordoet.

4.2.4 Conclusie

Naar aanleiding van de toetsing aan de hand van de veldmetingen van Damveld (2013) kan geconcludeerd worden dat zowel de formule van Wesseling als de formule van Hooghoudt redelijk dicht bij de werkelijke opbolling zit. Er kan aan de hand van deze toetsing dus geconcludeerd worden dat beide formules een redelijk nauwkeurige benadering geven aan de werkelijkheid. Wanneer echter een kwelaanvulling toegepast wordt volgens de methode in dit onderzoek, gerelateerd aan een schatting die in de praktijk toegepast wordt, wordt geconcludeerd dat het toepassen van een kwelaanvulling onjuist is.

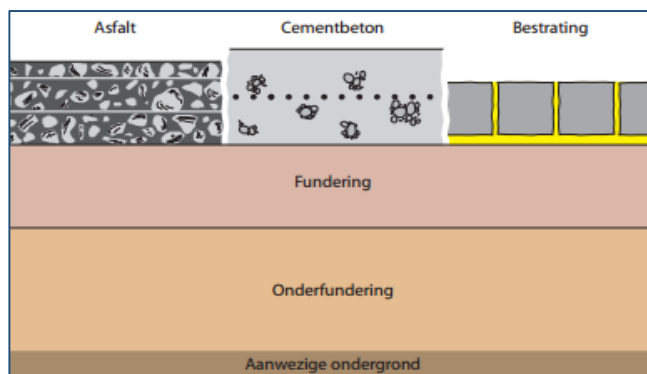
5 Onderzoek aanpassing wegcunet

Na het onderzoeken van de formules en het bepalen van de verschillende maten van opbolling is het van belang dat gekeken wordt naar de weg. Want een betere droogleggingseis wil niet zeggen dat het direct mogelijk is om de opbouw van de weg aan te passen. In dit hoofdstuk zal daarom worden onderzocht of het mogelijk is om een eventueel betere droogleggingseis door te voeren in het wegontwerp, welke bij de aanleg van nieuwe wegen gebruikt kan worden.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Er wordt begonnen met het bestuderen van de wegconstructie, zodat duidelijk is welke lagen aanwezig zijn in het wegontwerp en welke functie deze uitvoeren. Vervolgens is gekeken naar de mogelijkheden om de weg met zijn fundering te toetsen. Van hieruit is gekeken, welke methode van toetsing het beste gebruikt kan worden. Tot slot is, wanneer de opbouw en toetsing van het wegontwerp met zijn fundering bekend zijn, bepaald in welke situaties het mogelijk is om op basis van de stabiliteit een besparing door te kunnen voeren. Wanneer dit bekend is, wordt inzichtelijk in welke mate de eventuele verbeterde droogleggingseis toegepast kan worden.

5.1 De eigenschappen van de wegconstructie

De opbouw van de weg bestaat volgens OCW (2006) globaal gezien uit 4 lagen. De aanwezige ondergrond, de onderfundering, de fundering en de wegverharding. Daarbij kan de wegverharding bestaan uit asfalt, cement of bestrating. CROW (2010) deelt het weglichaam¹³ op in de 2 hoofdelementen aardebaan en verharding. De aardebaan bestaat hier uit de onderfundering en de aanwezige ondergrond en de verharding uit de fundering en de wegverharding. Hierbij is het van belang dat in het hoofdelement



Figuur 24: Principetekening opbouw van de wegconstructie (OCW, 2006)

verharding geen grondwater komt te staan. Dit hoofdelement wordt ook wel de vorstvrije zone genoemd. Onder het hoofdelement aardebaan valt over het algemeen de droogleggingseis. In het hoofdelement aardebaan is grondwater wel toegestaan. In Figuur 24 wordt een principetekening gegeven van de opbouw van de benoemde lagen. De lagen zoals net benoemd zullen in dit hoofdstuk van onderste naar bovenste laag behandeld worden.

5.1.1 De aanwezige ondergrond

De aanwezige ondergrond wordt ook wel de natuurlijke ondergrond genoemd. Deze natuurlijke ondergrond moet de krachten van het weglichaam en de verkeersbelasting kunnen dragen. Wanneer dit niet het geval is, is het van belang dat er een aanpassing wordt gedaan om de aanwezige ondergrond sterk genoeg te maken. Men past in deze situaties grondverbetering toe en krijgt te maken met het wegcunet. De letterlijke betekenis van een cunet betreft volgens Vree (2015) "een in de wegenbouw uitgegraven gedeelte waar niet-draagkrachtige grond aanwezig was, ongeveer ter breedte van de aan te leggen weg." De grondverbetering wordt gerekend tot het hoofdelement aardebaan. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010 ; Deltares, 2009)

¹³ Alle constructieve delen van de weg, waardoor deze de belasting naar de ondergrond kan afvoeren. Dus alle beschreven lagen zonder de natuurlijke ondergrond.

Een aanpassing in de ondergrond moet volgens fvb-ffc Constructiv (2012) gedaan worden, wanneer de draagkracht van het baanbed kleiner is dan 17 MPa. De aardebaan in het wegcunet moet vervolgens na verbetering wel aan de volgende eisen voldoen. Fvb-ffc Constructiv (2012) stelt dat het cunet voldoende poreus moet zijn om ingedrongen water voldoende door te laten, het cunet niet capillair mag werken en dus niet opvriest, en tot slot voldoende vormvast moet zijn. Daarnaast moet deze zo opgebouwd zijn dat de fundering en eventuele onderfundering ongevoelig zijn voor water en vorst (Deltares, 2009). Wanneer men dit voor elkaar krijgt, zal dat ervoor zorgen dat het wegdek en de fundering niet kapot vriezen of bezwijken, zoals wel het geval is in Figuur 25.



Figuur 25: Vorstschade aan het wegdek

Het draagvermogen van de ondergrond is dus erg bepalend voor het weglichaam. OCW (2006) verklaart dat het economisch heel aantrekkelijk kan zijn grondverbetering toe te passen, aangezien het draagvermogen van de ondergrond voor een groot deel de opbouw (en dikte) van het weglichaam bepaald. Van der Velden (2004) concludeert hierbij dat het draagvermogen van de aardebaan wordt bepaald door de vormvastheid van het materiaal in de aardebaan. Hierbij spelen de volgende elementen volgens Van der Velden (2004) een rol: de stapeling, ruwheid en hardheid van de korrels en het dikte van het pakket voor krachtsoverdracht.

Er worden door OCW (2006) en CROW (2010) verschillende methoden gegeven voor grondverbetering. Namelijk verdichting van de ondergrond, behandeling van de aanwezige ondergrond, vervanging van de aanwezige ondergrond en het opbrengen van zand op de ondergrond. Bij de methodes voor grondverbetering benoemd Van der Velden (2004) nog het volgende: “Wanneer er voor de verbetering van de aanwezige ondergrond een ontgraving plaats moet vinden, wordt deze ontgraving een cunet genoemd”. Aan de hand van benoemde methodes voor grondverbetering, kan voor een verbetering van de elementen benoemd door Van der Velden (2004) gezorgd worden.

Bij een verdichting van de ondergrond streeft men ernaar om de poriën¹⁴ in de grond te verkleinen, zodat een sterker “skelet” wordt verkregen. Bij de behandeling van de ondergrond doelt men op het wijzigen van fysische en mechanische eigenschappen door het toevoegen van een bindmiddel. Dit bindmiddel kan bijvoorbeeld kalk of cement betreffen. (OCW, 2006)

Bij vervanging van de aanwezige ondergrond wordt een cunet gegraven, zoals gedefiniëerd door Van der Velden (2004) en deze wordt opgevuld met bijvoorbeeld zand en bij het opbrengen van zand op de ondergrond creëert men een situatie, waarbij de aanwezige ondergrond als het ware wordt “weggeperst”. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

5.1.2 De onderfundering

De onderfundering is de onderste laag van de fundering en de hoogst liggende laag die onder de aardebaan valt. De grondverbetering doet ten goede aan de onderfundering en er kan dan ook gezegd worden dat er enige overlap is tussen de aanwezige ondergrond en onderfundering, wanneer een grondverbetering plaats moet vinden. Dit kan bijvoorbeeld een zandbed zijn. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010) OCW (2006) definieert de onderfundering als volgt: “de buffer tussen de grond en de fundering meestal bestaande uit een zandbed”.

¹⁴ Openingen, welke zich tussen de korrels van het materiaal (bijvoorbeeld zand) bevinden.

De definitie van OCW (2006) verklaart dat er meestal een zandbed gebruikt wordt. Echter worden er ook andere soorten materialen voor de onderfundering gebruikt. OCW (2006) geeft hiervoor zelf de mogelijkheden:

- Onderfundering van zand
 - o Hierbij kan ook gebruik gemaakt worden van draineerzand.
- Onderfundering van steenslag
 - o Er wordt hier een mix gebruikt van een homogeen mengsel van zand en grove steenslag met korreldiameter 90 of 125 mm.
- Onderfundering met (poederkool)vliegash
 - o "Poederkoolvliegash of vliegash is een restproduct van kolengestookte elektriciteitscentrales. Het bestaat uit bolvormige, glasachtige deeltjes van kiezelzuur en aluminiumoxide" (De Vree, 2015)
- Onderfundering van gestabiliseerde grond
 - o In dit geval wordt alleen gebruik gemaakt van grondverbetering zoals besproken in de paragraaf "De aanwezige ondergrond".
- Onderfundering van Staalslakken en/of bodemassen
 - o Bodemas is een zwart zandig materiaal wat wordt ingezet als secundaire bouwstof in de wegenbouw. Het is net als staalslakken een duurzaam materiaal, welke hergebruikt kan worden. Het gebruik ervan zorgt voor een besparing van zand en grind. (Verbunt, 2015) Staalslakken zijn de bijproducten die ontstaan bij de productie van staal. Na de productie en het afkoelen ervan worden de staalslakken gebroken tot een bruikbaar product met veelal diameter 40-160mm. (Schrootplaza.nl, 2014)

Onder de onderfundering benoemd Van der Velden (2004) het feit dat de vochtigheidsgraad¹⁵ hierin een belangrijke factor is. De onderfundering moet ervoor zorgen dat de dikte van de drooglegging¹⁶ voldoende is, zodat er geen grondwater opbult tot in de wegfundering. De gevolgen bij vorst zijn volgens CROW (2014): de verharding kan stukvriezen, de weg kan opvriezen¹⁷ en er kan opdooi¹⁸ plaatsvinden. CROW (2010) stelt nog de volgende eis wanneer betreft drooglegging als de verharding direct op de ondergrond aangebracht wordt: "rekening houdend met capillaire opstijging, moet het grondwaterpeil ten minste 0,8 tot 1,0 meter onder de bovenkant van de verharding worden gehouden".



Figuur 26: Aanbrengen van EPS-blokken



Figuur 27: Aanbrengen van schuimbeton

¹⁵ Het vochtpercentage (Van der Velden, Wegenbouwkunde, 2004)

¹⁶ "Het verschil tussen de hoogte van de top van het weglichaam en het slootpeil in de berm" (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014, p. 207)

¹⁷ Er vormt zich ijs op het wegdek

¹⁸ "bij invallende dooi kan het water in het ontdooide deel van de wegconstructie niet afvloeien als nog een deel van het ijs aanwezig is in de verharding" (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014)

Tot slot kan de onderfundering nog lichte ophoogmaterialen bevatten. Deze worden volgens CROW (2013) gebruikt wanneer bijvoorbeeld het ophogen van wegen en terreinen of het reduceren van gewicht nabij kwetsbare ondergrondse infrastructuur nodig is. CROW (2013) beschrijft drie soorten: de granulaire materialen, EPS-blokken en schuimbeton. Granulaire materialen betreffen verscheidene materialen in korrelvorm met een laag gewicht per m^3 . EPS-blokken (Figuur 26) betreft het lichtste ophoogmateriaal en wordt in blokken geleverd welke neergelegd kunnen worden. De blokken kunnen gerecycled worden en verwerkt worden in nieuw materiaal. Schuimbeton (Figuur 27) betreft een specie die uit hard en waar naar doel betreffende materialen aan toegevoegd kunnen worden, zoals bijvoorbeeld een granulaire materiaal. (CROW, 2013)

5.1.3 De fundering

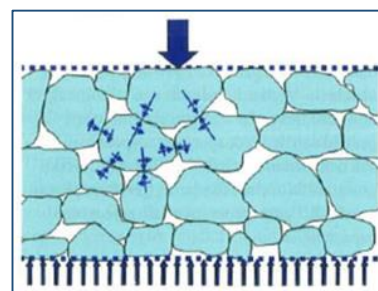


Figuur 28: Voorbeeld spoorvorming.

De fundering vormt het eerste element van de verharding. Deze ondersteunt het wegdek en zorgt er daarbij voor dat de belastingen worden overgedragen op de ondergrond. De onderfundering deelt deze functie met de fundering, alleen ligt bij de fundering in de wegverharding de focus vooral op de stijfheid en relatief hoge weerstand tegen permanente vervorming, ook wel spoorvorming genoemd. Spoorvorming betreft het voorval, wanneer diepe sporen in het asfalt te zien zijn. Het betreft dus een verzakking in de wegverharding door te zware belasting. Figuur 28 geeft een mooi voorbeeld, waarbij de waterpas de horizontale rechte lijn had moeten zijn van het wegdek. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014)

De fundering heeft twee fases waarin het een functie uitvoert: de bouwphase en de gebruiksfase. Tijdens de bouwphase heeft de fundering een functie als bouwweg, werkvloer, vochtthuishoudend-regulerende laag en tot slot als last spreidende laag. In de gebruiksfase heeft de fundering een functie als dragende laag, het beperken van de vervorming, wederom de last spreidende laag en als drainerende laag. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014). Er kan dus geconcludeerd worden dat de fundering niet alleen tijdens de gebruiksfase, maar ook tijdens de bouwphase heel belangrijk is.

Voor de wegfundering worden door CROW (2014) drie soorten gegeven: de ongebonden, gebonden en zelfbindende fundering. In een ongebonden fundering wordt gebruik gemaakt van een laag ongebonden steenmengsel. Dit betekent dat het steenmengsel zijn stabiliteit behaalt uit de haakweerstand¹⁹ tussen de vlakken van de verschillende korrels. CROW (2014) stelt uit het volgende citaat vast dat het gedrag van een ongebonden fundering sterk afhankelijk is van de bepaalde spanningscondities die zich in de constructielaag bevinden: "De haakweerstand stelt de funderingslaag in staat schuifspanningen²⁰ op te nemen. De krachtsoverdracht is hierbij niet alleen van de schuifspanning afhankelijk, maar ook van de normaalkrachten. Hoe vaster de korrels op elkaar worden gedrukt, hoe groter de krachten loodrecht (normaalkrachten) op het contactvlak en hoe groter de capaciteit om



Figuur 29: Krachtenoverdracht in een ongebonden fundering (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014)

¹⁹ Het tegengaan van een verschuiving van de grond, doordat de korrels van het steenmengsel in elkaar haken. De druk tussen de korrels is echter niet dermate groot dat ze bezwijken. De fundering is dus voldoende draagkrachtig. (CROW, 2004, pp. 119 - 120)

²⁰ "Spanningscomponent die in het vlak van een doorsnede werkt" (Hibbeler, 2006, p. 32). Dus de spanning die zich aan een stukje oppervlak aan de buitenzijde van een korrel bevindt.

schuifspanningen te weerstaan. Dit vergroot de stabiliteit van de fundering, waardoor deze een hogere verkeersbelasting kan dragen.” In Figuur 29 is de situatie weergegeven van de krachtenoverdracht binnen een ongebonden wegfundering.

In een gebonden fundering wordt gebruik gemaakt van een bindmiddel om een laag van grof tot fijnkorrelig steenachtig materiaal te binden. Dit bindmiddel zorgt voor de onderlinge binding tussen de korrels in tegenstelling tot bij een ongebonden fundering, waar de korrels de haakweerstand gebruiken. Het bindmiddel zorgt er dan ook voor een toename van de sterkte en stijfheid van de fundering. Als bindmiddel wordt veelal kalk, cement en schuimbeton gebruikt of een combinatie hiervan. De gebonden funderingen zijn beter geschikt om op een slecht draagkrachtige ondergrond te gebruiken, omdat deze de krachten beter kan doorspelen naar de ondergrond. Echter is dit type fundering wel gevoeliger voor scheurvorming dan de andere type funderingen. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014 ; Van der Velden, Wegenbouwkunde, 2004)

Een zelfbindende fundering is een bijzonder stukje techniek. De definitie volgens CROW (2014) luidt als volgt: “een laag steenachtig, korrelvormig materiaal waarvan de stijfheid in de tijd toeneemt zonder dat een specifiek bindmiddel is toegevoegd”. Als voorbeeld wordt een zelfbindende fundering genomen met hoogovenslakken. Een zelfbindende fundering heeft twee elementen nodig. Een combinatie van steenmengels die latent hydraulisch²¹ zijn en een activator of stabilisator²². De gebroken hoogovenslakken zijn latent hydraulisch en doordat er LD-staalslakken toegevoegd worden zal de reactie plaatsvinden. De LD-staalslakken bevatten namelijk kalk en deze kalk zal als activator werken. De krachtsoverdracht die plaatsvindt in een zelfbindende fundering komt in principe overeen met die van de ongebonden fundering. Echter zijn bij een zelfbindende fundering de korrels op de contactpunten aan elkaar gekit als gevolg van de chemische reactie. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014 ; Van der Velden, Wegenbouwkunde, 2004)

5.1.4 De wegverharding

De bovenste en dus laatste laag van het weglichaam is de wegverharding. Zoals genoemd kan deze uit de volgende lagen bestaan: asfalt, beton of bestrating. Het is echter niet zo eenvoudig dat men bijvoorbeeld één dikke laag asfalt draait. Bij de opbouw van de wegverharding komt dus meer kijken. In Figuur 30 is een schematisatie van de wegoopbouw gegeven welke in deze paragraaf nader toegelicht zal worden.



Figuur 30: Schematisatie van de opbouw van de wegverharding

CROW (2010) geeft aan, dat in een asfaltweg altijd onderscheidt gemaakt moet worden tussen een deklaag, tussenlaag en één of meerdere onderlagen. Wanneer men te maken heeft met een dunne constructie hoeft er geen tussenlaag gebruikt te worden. Van der Velden (2004) ondersteunt dit argument en stelt daarbij de eis, dat elke lager gelegen laag 100 mm breder wordt aangelegd. Ook moet tussen elke laag een kleeflaag aangebracht worden welke uit een bitumenemulsie²³ bestaat en onder druk op de ondergrond gespreid wordt (Van der Velden, Wegenbouwkunde, 2004).

²¹ Met zelfbindende eigenschappen (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014, p. 39)

²² Een component met de juiste chemische bestanddelen ter activering van deze latente zelfbinding (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014, p. 39)

²³ Emulsie van water en bitumen (viskeuze vloeistof van naturen afkomstig uit ruwe aardolie) (Rijksoverheid, 2015)

De onderlaag heeft als functie om de optredende trekspanning²⁴ van de verkeersbelasting op te vangen en het moet oneffenheden in de zettingen²⁵ kunnen volgen, zonder verlies van sterkte in de constructie. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

De tussenlaag wordt ook wel gedefinieerd als de binder. Het betreft de laatste laag, voordat de deklaag aangebracht wordt. De functies die tot de tussenlaag behoren zijn vlakheid en verankering voor de deklaag. Daarnaast moet een goede overdracht van schuifspanningen plaatsvinden. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

Tot slot nog de deklaag. CROW (2010) definieert de deklaag ook wel als de toplaag. Aangezien de deklaag direct onder invloed staat van alle verkeerskrachten, klimaat en de atmosfeer worden er door CROW (2010) en Van der Velden (2004) hoge eisen aan de deklaag gesteld. Deze eisen variëren nog wel per type weg. Het betreffen eisen ten aanzien van slijtvastheid, weerstand tegen vervorming, stofheid, vlakheid, textuur, afwatering en atmosferisch invloeden.

Voor een verharding van beton gaan in principe dezelfde maatregelen vooraf als bij een asfaltverharding. Het grote verschil is dat men bij een deklaag van betonverharding te maken heeft met een starre constructie en de betonplaat dus bij een zettingsverschil zal scheuren. Het grote voordeel van een betonverharding is dat het duurzaam. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

Wanneer men gebruik maakt van bestrating of zoals van der Velden (2004) definieert “elementverharding” is over het algemeen een zandbed of aardebaan als fundering voldoende, maar er wordt ook dikwijls gebruik gemaakt van een fundering. Bestrating is niet geschikt voor snelrijdend verkeer, aangezien de kwetsbaarheid van het verkeer dan sterk toeneemt. Bij snelrijdend verkeer worden de voegen namelijk leeggezogen en komen deze deeltjes op het wegdek te liggen. Dit beïnvloedt de stroefheid in negatieve zin. Wat bestrating erg geschikt maakt in woonwijken is dat het gemakkelijk verwijderd en opnieuw geplaatst kan worden. In woonwijken en dergelijken liggen namelijk veel kabels en leidingen, die nogal eens een wijziging moeten ondergaan. (Van der Velden, Wegenbouwkunde, 2004)

5.2 Toetsingsmethodes voor de weg(fundering)

De focus van de toetsing van de wegconstructie ligt vooral in de draagkracht. De drooglegging wordt in de wegenbouw in eerste instantie vooral aan de hand van een standaard dikte van het zand voor zandbed bepaald, rekening houdend met de bekende grondwaterstanden uit de omgeving. Zo verklaart Van de Gevel (2015), dat bijvoorbeeld bij de gemeente Dordrecht een 600 millimeter dikte voor het zand voor zandbed wordt genomen, maar dat hij zelf voornamelijk 400 millimeter hanteert bij het ontwerp. Een factor die hier volgens Van de Gevel (2015) in mee speelt is de ervaring die men met deze keuze heeft. Tussentijds wordt de formule van Hooghoudt er nog op losgelaten voor de opbolling van het grondwater.

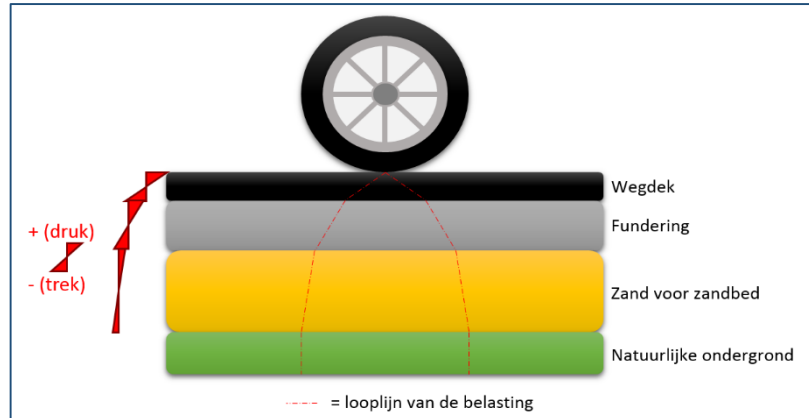
5.2.1 Ontwerpparameters van de wegconstructie

Voor het ontwerpen van de constructie op draagkracht wordt rekening gehouden met zeven parameters: het aantal voertuigen, het type belasting, het aantal dagen van belasting, levensduur, de breedte van de weg, de snelheid die gereden wordt en tot slot het aantal rijstroken. (Van de Gevel, 2015)

²⁴ Als een normaalkracht aan een oppervlakte “trekt”. (Hibbeler, 2006, p. 23)

²⁵ “verticale neerwaartse verplaatsing van (de bovenzijde van) een grondslag” (CROW, 2004, pp. 528 - 529)

Zoals onder Paragraaf 5.1 “De eigenschappen van de wegconstructie” besproken, behoort een met asfalt verharde weg tot de flexibele wegen. Deze flexibiliteit zorgt er ook voor dat de weg bij elke belasting een klein stukje doorbuigt. Dus wanneer hier een voertuig overheen rijdt. De krachten die het voertuig



Figuur 31: Belasting situatie in de wegconstructie

levert worden als eerste opgevangen door het asfalt, waarbij het asfalt een stukje doorbuigt. De krachten die daardoor in de asfaltverharding, maar ook in de onderliggende lagen ontstaan zijn trek en druk krachten. In de asfaltverharding heeft men nog te maken met een grote hoek van de belasting. Naarmate men verder naar onder gaat in de lagen van het weglichaam wordt deze hoek kleiner. In Figuur 31 wordt dit toegelicht. Als de belasting weer van het asfalt af is buigt deze weer zo goed als terug naar de oorspronkelijke situatie. Bij de doorbuiging is wel een microscheurtje ontstaan. Doordat gedurende de jaren deze herhaling elke keer optreedt, zullen deze microscheurtjes steeds verder naar het oppervlak uitbreiden tot dat de wegverharding het begeeft. De weg is op dat moment aan het einde van zijn levensduur. (Van de Gevel, 2015) &

De zeven parameters zoals zojuist benoemt geven de maat aan de belasting die de wegconstructie aan moet kunnen gedurende een bepaalde tijd. Er zal dan ook per parameter beschreven worden op welk aspect het invloed heeft en welke verklaring achter deze invloed ligt. Ten eerste de aspecten die de voertuigen mee brengen. Van de Gevel (2015) verklaart dat voor het type belasting gekozen wordt voor een vrachtwagen. Een vrachtwagen heeft namelijk een veel hogere aslast dan een auto. Naar schatting komt het neer op 1 vrachtwagen staat gelijk aan 100.000 auto's die 1 keer over het stuk asfalt rijden en dus 1 maal de belasting veroorzaken. Dit brengt ons gelijk bij de parameter voor het aantal voertuigen per etmaal. Hoe meer voertuigen er zijn, hoe meer herhalingen van de belasting en hoe vaker de microscheur.

Omdat het vrachtverkeer als maatgevend genomen wordt en dit werkverkeer betreft kan worden aangenomen dat in sommige regio's niet gedurende de complete 365 dagen werkverkeer aanwezig is. Het aantal dagen dat het vrachtverkeer over de weg heen rijdt heeft namelijk ook invloed op de constructie. Van de Gevel stelt dat 270 dagen per jaar gewoonlijk gebruikt wordt voor het aantal dagen dat het vrachtverkeer aanwezig is. In de Randstad kan dit echter ook gesteld worden op de volle 365 dagen. Daarnaast komt nog de snelheid waarmee het verkeer over de weg rijdt. Als het verkeer langzamer rijdt komt de belasting langer op een bepaald punt in het asfalt te staan en zal de doorbuiging en dus microscheurvorming iets groter zijn. Bij hogere snelheden krijgt men een tegenovergesteld effect. Als waarde voor de parameter snelheid wordt over het algemeen 80 km/uur genomen. (Van de Gevel, 2015)

Tot slot nog de drie verschillende parameters die betrekking hebben op de constructie. De breedte van de weg heeft invloed op het spoor, waar op de weg op wordt gereden. Wanneer een rijstrook smal is, zal gereden worden op een kleiner oppervlak van de weg dan wanneer de rijstrook breed is. De microscheurvorming vindt bij een dunne rijstrook dus vaker plaats op een zelfde locatie. Voor het aantal rijstroken geldt het principe dat de vrachtwagens veelal op de meest rechter rijstrook rijden. Dit is vooral kijkend naar rijkswegen een belangrijk aspect. De rest van de rijstroken zal gebruikt

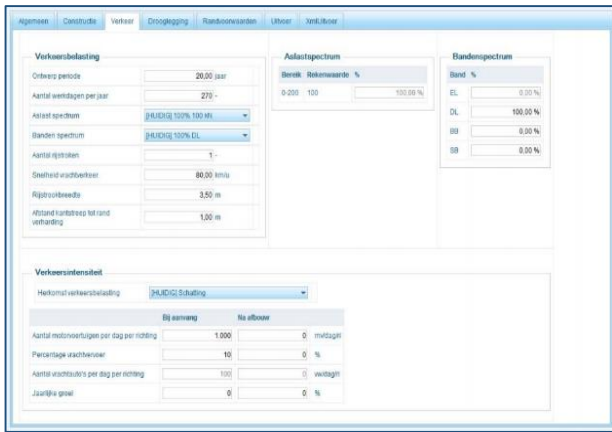
worden door autovoertuigen en de belasting op die rijstroken is dus, zoals eerder besproken, veel minder groot. Met levensduur wordt bepaald hoe lang de weg het uit moet houden, voordat deze niet meer voldoet aan de stabiliteit en kan gaan bezwijken. Over het algemeen worden de wegen berekend op een levensduur van 20 jaar. (Van de Gevel, 2015)

Het is dus gebruikelijk dat bij de parameters eerst gekeken wordt naar een bepaalde vastgelegde waarde. Toch blijft het bij elke parameter zo dat er een keuze te maken valt en kunnen aan de hand van bepaalde gestelde eisen deze waardes aangepast en doorgevoerd worden.

5.2.2 Ontwerp en toetsing van de wegconstructie

Nu alle parameters bekend zijn kan het ontwerp en de toetsing van de wegconstructie bepaald gaan worden. Voor het ontwerpen wordt gebruik gemaakt van software. Het softwareprogramma CARE of zijn vernieuwde versie OIA wordt hiervoor gebruikt (Figuur 32). In deze software kunnen alle besproken parameters ingevuld worden en bepaalde lagen toegevoegd worden. Vervolgens worden aan de hand van het softwareprogramma de diktes van de weglagen bepaald en dus een conceptversie voor het wegontwerp gegenereerd. (V&W Asphalt, 2010)

Van de Gevel (2015) stelt dat het bij het ontwerpen van de wegconstructie heel belangrijk is om naar het geheel te kijken. De lagen zijn namelijk zo ontworpen dat ze elkaar ondersteunen. De krachten die de onderste laag opvangt zijn lager dan de bovenste laag. Een dikke bovenste laag zorgt ervoor dat in de onderste lagen minder kracht opgevangen hoeft te worden en hierin kan in dikte vervolgens bespaard worden. Echter is het afhankelijk van de kosten, dus ook materiaalkeuze, welke laag dikker wordt gedimensioneerd en welke dunner. Hier ligt de economische factor in het geheel. Van de Gevel vermeldt: "Uiteindelijk draait het om het zo goedkoop mogelijk realiseren van de wegconstructie, waarbij aan alle eisen voldaan wordt." Doordat de lagen dus afhankelijk van elkaar zijn is het niet zomaar mogelijk om één laag te verdunnen zonder aanpassingen te doen in de bovenliggende lagen. Het geheel van het ontwerp van de wegconstructie bestaat dus al met al uit het maken van veel verschillende keuzes. Daarbij wordt geregeld gebruik gemaakt van eerdere ervaringen uit voorgaande projecten en referentieprojecten.



The screenshot shows the OIA software interface with several tabs: Algemeen, Constructie, Verkeer, Drooglegging, Randvoorwaarden, Uitvoer, and Werkbladen. The 'Verkeer' tab is active, displaying input fields for traffic load and spectrum. Below this is a table for 'Verkeersintensiteit' (Traffic Intensity) with columns for 'Bij ontwerp' (At design) and 'Na afbouw' (After construction).

Verkeersintensiteit		
	Bij ontwerp	Na afbouw
Aantal motorvoertuigen per dag per richting	1.000	0
Percentage vrachtwagens	10	0
Aantal vrachtwagens per dag per richting	100	0
Jaarlijkse groei	0	0

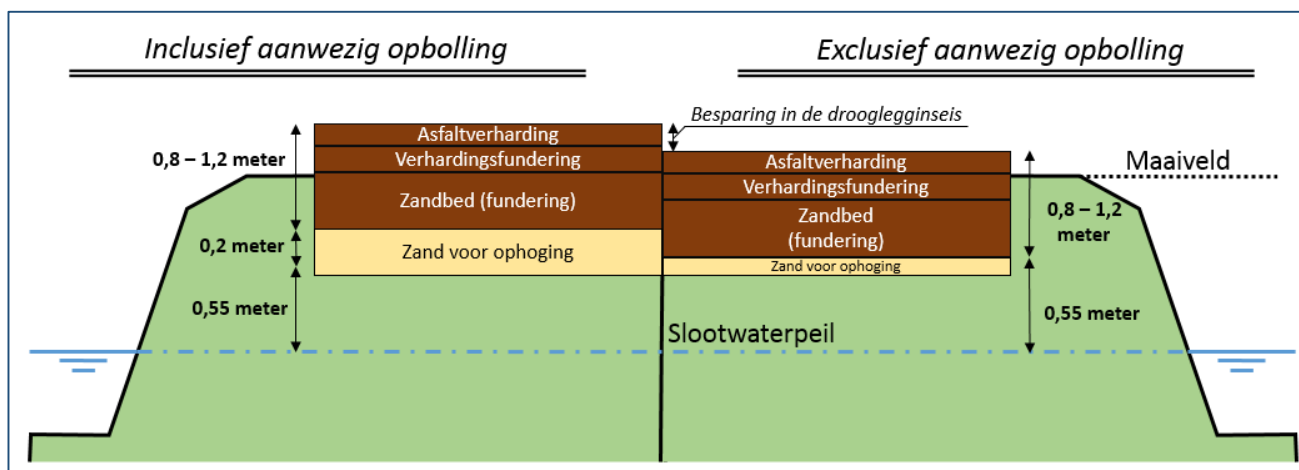
Figuur 32: Voorbeeldpagina OIA (V&W Asphalt, 2010)

De dikte van het wegontwerp zal over het algemeen altijd een dikte van 0,8 meter tot 1,2 meter bedragen. Deze laag wordt de vorstvrije zone genoemd. Dit betreft de verharding met zijn fundering en onderfundering. De drooglegginseis is hier nog niet in meegenomen. (Van der Velden, 2004)

Naast de theoretische vergelijking wordt in de wegenbouw ook gebruik gemaakt van een aantal toetsingmethodes op locatie. Deze toetsingmethodes zijn de vinden in Bijlage C.

5.3 Bepaling aanpassingslimiet wegcunet

Nu uit de Paragrafen 5.1 en 5.2 de basisinformatie vergaard is kan gekeken worden naar de mogelijkheden om een besparing te doen bij een verbeterde droogleggingseis. Nadat in eerste instantie werd gedacht dat het zand voor zandbed voor drooglegging ook belangrijk was voor de stabiliteit van de constructie, blijkt nu dat deze helemaal geen grote rol speelt in de draagkracht. De basisconstructie van 0,8 tot 1,2 meter bestaande uit de verhardingen en funderingen moet ervoor zorgen dat alle krachten afgevoerd kunnen worden en de stabiliteit gewaarborgd blijft. Het zand voor zandbed in het wegcunet voor drooglegging moet logischerwijs enige draagkracht aankunnen, maar heeft voornamelijk als functie om het grondwater af te voeren en op te vangen. Dit betekent dat bij een nauwkeurigere, wellicht kleinere, droogleggingseis het zandpakket voor drooglegging verkleind kan worden. Dit vergt wel een gunstige ligging van de weg. In Figuur 33 is een situatie aangegeven, waarbij het wegontwerp wordt geschetst inclusief en exclusief de droogleggingseis voor de opbolling. In Figuur 33 zijn de diktes van de lagen gebruikt zoals in de meeste situaties door Van de Gevel (2015) in praktijk gebruikt. Hierdoor wordt gestreeft naar het geven van een zo realistisch mogelijk praktijkvoorbeeld.

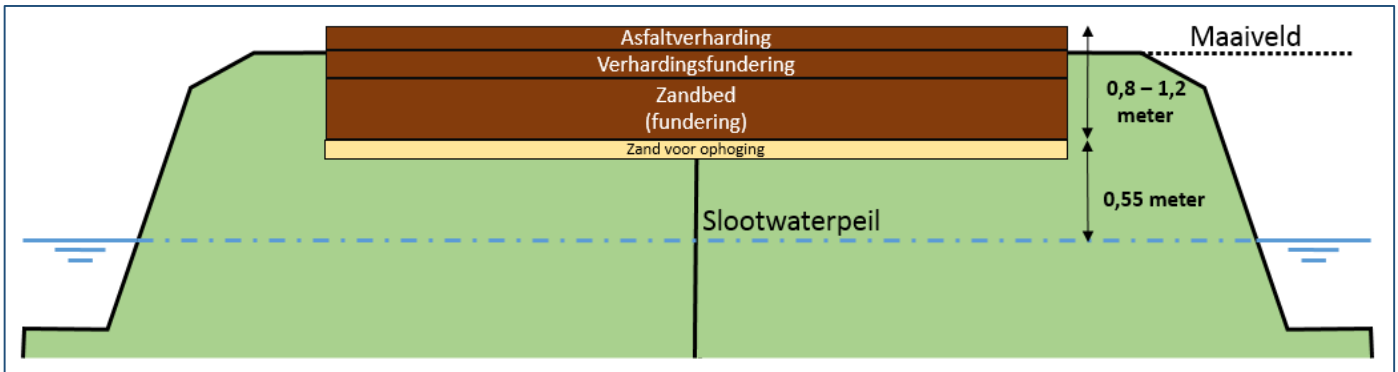


Figuur 33: Wegontwerp met en zonder droogleggingseis

Wat direct opvalt, is dat zonder de droogleggingseis voor de opbolling veel minder zand voor een ophoging gebruikt hoeft te worden. Onder de laag met zand voor ophoging is 0,55 meter speling gehouden. Deze speling betreft het rekening houden met de aanwezige capillaire stijghoogte. In elk project kan deze waarde voor de capillaire stijghoogte verschillen. Een nauwkeurigere droogleggingseis die lager uitvalt betekend dus een dunnere laag zand voor ophoging en de mogelijkheid tot een besparing. Hierdoor zal het wegontwerp ook minder hoog boven het maaiveld uitsteken. In dit onderzoek is dus gekeken naar een besparing op het onderdeel opbolling van de drooglegging in Figuur 33. In deze situatie is dus een maximale besparing mogelijk van 20 centimeter zand voor zandbed als aangenomen wordt, dat de maximale opbolling 20 centimeter is en blijkt dat er geen opbolling plaatsvindt. Op basis van de uitgangspositie van Figuur 33, resulteert dit in de schets van het wegontwerp zoals in Figuur 34.

Er kan dus gesteld worden, met bevestiging door Van de Gevel (2015), dat in situaties met een hoge grondwaterstand en een situatie waar men afhankelijk is van een ophoging met zand ten gevolge van de droogleggingseis een besparing gedaan kan worden. Daarbij is een constatering van een lager uitkomende opbolling ten opzichte van de formule van Hooghoudt van groot belang. Deze situaties zullen voornamelijk voorkomen in de polders, het Noorden en Westen van Nederland, maar in het zuiden van Limburg zal een dergelijke situatie bijvoorbeeld niet snel voorkomen. Van de Gevel (2015) vermeldt daarnaast, dat rijkswegen over het algemeen redelijk hoog aangelegd worden, waardoor men vaak minder snel te maken krijgt met een mogelijkheid tot besparing in de droogleggingseis. De

grondwaterstand komt hierdoor namelijk redelijk diep te liggen ten opzichte van het wegontwerp. Wel zegt Van de Gevel (2015), dat er wel degelijk rijkswegen, zoals besproken, benaderd kunnen worden. Exacte aantallen kunnen echter niet vermeld worden. Aangezien in Nederland bij een groot deel van het land de grondwaterstand vrij dicht onder het maaiveld ligt, wordt verwacht dat er voldoende situaties voor kunnen komen met een rendabele besparing. Voor lagere orde wegen wordt echter wel vermeld dat vaak rekening gehouden moet worden met de droogleggingseis, waardoor de mogelijkheden hier wellicht groter zijn.



Figuur 34: Schets wegontwerp zonder optredende opbolling

6 Conclusie

Na het uitvoeren van alle toetsingen, uitwerken van de resultaten en het analyseren van deze resultaten is het mogelijk om de conclusies te gaan formuleren. De theoretische en praktische benaderingen aan de formules en het wegcunet hebben een aantal inzichten gegeven die nu gebruikt kunnen worden om de antwoorden op de onderzoeksvragen te geven.

Hoofdvraag 1

Uit de resultaten van het bodemonderzoek in Bijlage A.3 in combinatie met het invullen van het stijghoogteverschil in de formule van Wesseling, volgt dat kwel een invloed uitoefent op de freatische grondwaterstand in de vorm van een opbolling. Daarbij kan vanuit de theoretische studie en parameterstudie met volledige zekerheid geconcludeerd worden, dat de formule van Hooghoudt, op de radiale kwel na, geen enkele vorm van kwel meeneemt en de formule van Wesseling deze kwel afkomstig van onder de scheidende laag wel meeneemt. Uit de resultaten van de toetsing aan de veldmetingen blijkt, dat het gebruik van een kwelaanvulling een onjuiste benadering is van de kwel in de formule van Hooghoudt. De berekende opbolling is dan groter dan in een praktijksituatie.

Naast de conclusies met betrekking tot kwel volgt uit de resultaten van de theoretische studie, dat Wesseling (1984) de neerslag te eenvoudig toevoegt en deze neerslag dus te eenvoudig wordt benaderd in zijn formule. Daardoor wordt gesteld, dat de formule van Wesseling zich focust op de aanvoer afkomstig van onder de scheidende laag. De formule van Wesseling benaderd de neerslag gezien het effect van de neerslag op de formule van Hooghoudt dus onjuist.

Met de resultaten van de toetsing aan de veldmetingen kan geconcludeerd worden dat de formule van Wesseling de opbolling, ten opzichte van de praktijk, met nauwkeurigheid benaderd. Vooral bij meetlocatie 3 wordt de formule van Wesseling zeer nauwkeurig bepaald, doordat het verschil tussen de praktijk en theorie een klein verschil betreft. De formule van Wesseling geeft daarnaast een nauwkeurigere uitkomst aan de veldmetingen dan de formule van Hooghoudt. Echter is het waargenomen verschil slechts enkele millimeters, waardoor gesteld kan worden dat de formule van Wesseling geen overtuigend beter resultaat geeft als de formule van Hooghoudt.

Tot slot volgt uit de theoretische studie, dat de doorlatendheden in de formules zeer gevoelige parameters zijn en dat een middeling, zoals toegepast in de formule van Wesseling, onnauwkeurig kan zijn. De opbouw van het cunet kan dus een erg grote invloed uitoefenen. Een onnauwkeurigheid in het bepalen van de doorlatendheden of het verkeerd benaderen van deze doorlatendheden in de formules zorgt voor een afwijking in de berekende opbolling.

Aan de hand van de bovenstaande conclusies betreffende de deelvragen is het antwoord op deze hoofdvraag, dat de formule van Wesseling bij een situatie met een grote verharding en een waarneembare aanwezigheid van kwel een betere uitkomst zal geven van de opbolling als de formule van Hooghoudt. De voorwaarde hierbij betreft dat de wegverharding de aanvoer van bovenaf minimaliseert. Tabel 8 verklaart daarbij, dat de formule van Hooghoudt beter is bij de berekening van de opbolling met hemelwater en de formule van Wesseling geschikt is in situaties, waarbij te maken is met kwel. Bij evenveel neerslag als kwel, is geen van beiden heel geschikt.

<u>N = Neerslag</u> <u>K = Kwel</u>	N	Veel N en weinig K	Evenveel N en K	Weinig N en veel K	Alleen kwel
Formule van Hooghoudt	+	+	+-	-	-
Formule van Wesseling	-	+-	+-	+	+

Tabel 8: Overzicht voor de geschiktheid van de formules (+ = bruikbaar en - = onbruikbaar)

Hoofdvraag 2

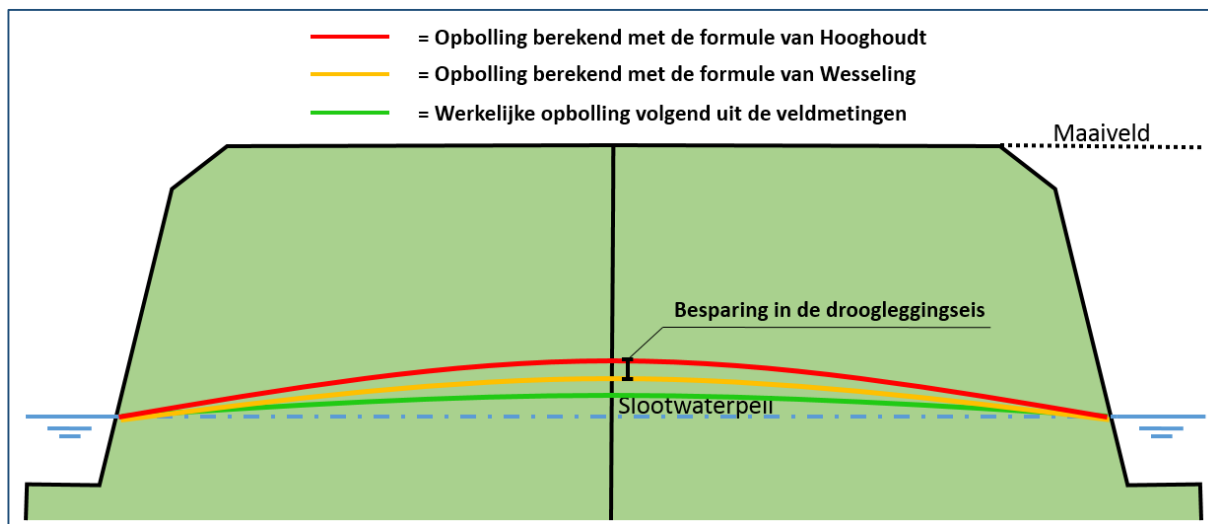
Uit de literatuurstudie kan geconcludeerd worden, dat tegenwoordig gebruik gemaakt wordt van enkel één toetsingsmethode voor het bepalen van de stabiliteit van de wegfundering. Er wordt gebruikt gemaakt van een software, waarin de eisen, de zeven parameters zoals toegelicht in Hoofdstuk 5.2, ingevuld worden. Hieruit volgt een conceptversie voor een praktijkontwerp en kan met laagdiktes en materialen geschoven worden om tot het goedkoopste definitieve wegontwerp te komen, die aan zijn stabiliteit voldoet.

Voor de huidige samenstelling van de opbouw van de weg kan geconcludeerd worden, dat alle lagen op het gebied van stabiliteit op elkaar afgestemd zijn, waardoor het niet mogelijk is een aanpassing van de dikte in een enkele laag toe te passen, zonder dat een aanpassing op een andere plek in het wegontwerp gedaan kan worden. Daarnaast volgt uit de resultaten, dat op het gebied van de stabiliteit de vorstvrije zone los ligt van de droogleggingseis, waardoor het zand voor zandbed bestemd voor drooglegging dus geen rol speelt in de stabiliteit van het huidige wegontwerp. Het is dus mogelijk zonder gevolgen voor de stabiliteit van het wegontwerp een aanpassing in de droogleggingseis doen. Daarom is er ook gekeken wanneer een besparing in het wegcunet mogelijk is. Uit het onderzoek volgt dat een besparing in het wegcunet doorgevoerd kan worden als er sprake is van een standaard grondwaterstand dicht onder het maaiveld. Daardoor zal de hele wegontwerp bij aanleg deels boven het maaiveld reiken. Een besparing in het wegcunet is dus locatieafhankelijk.

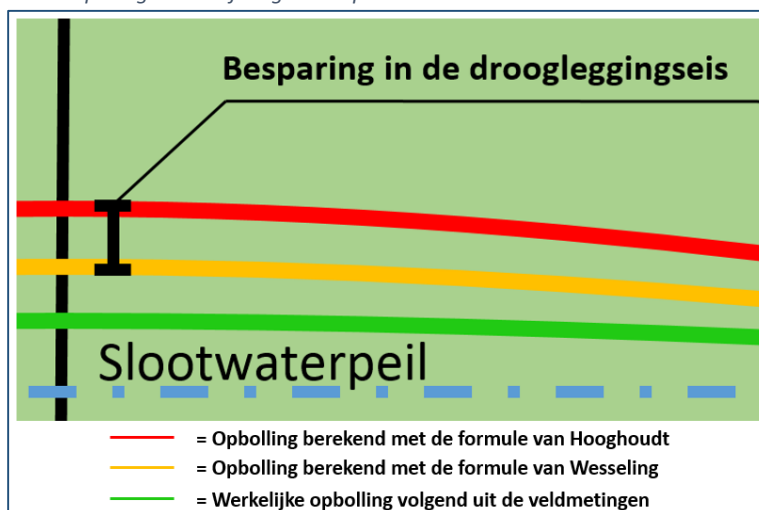
Met de antwoorden op de deelvragen kan geconcludeerd worden, dat een mogelijke besparing afhankelijk is van de grondwatersituatie in de omgeving. Bij een diepe grondwaterstand zal geen besparing mogelijk zijn. In het geval van een ondiepe grondwaterstand is de besparing zo groot als het verschil tussen de huidige droogleggingseis en de eventueel nieuwe droogleggingseis berekend met de formule van Wesseling, zoals weergegeven in de Figuren 35, 36 en 37 op de volgende pagina.

Algemene conclusie

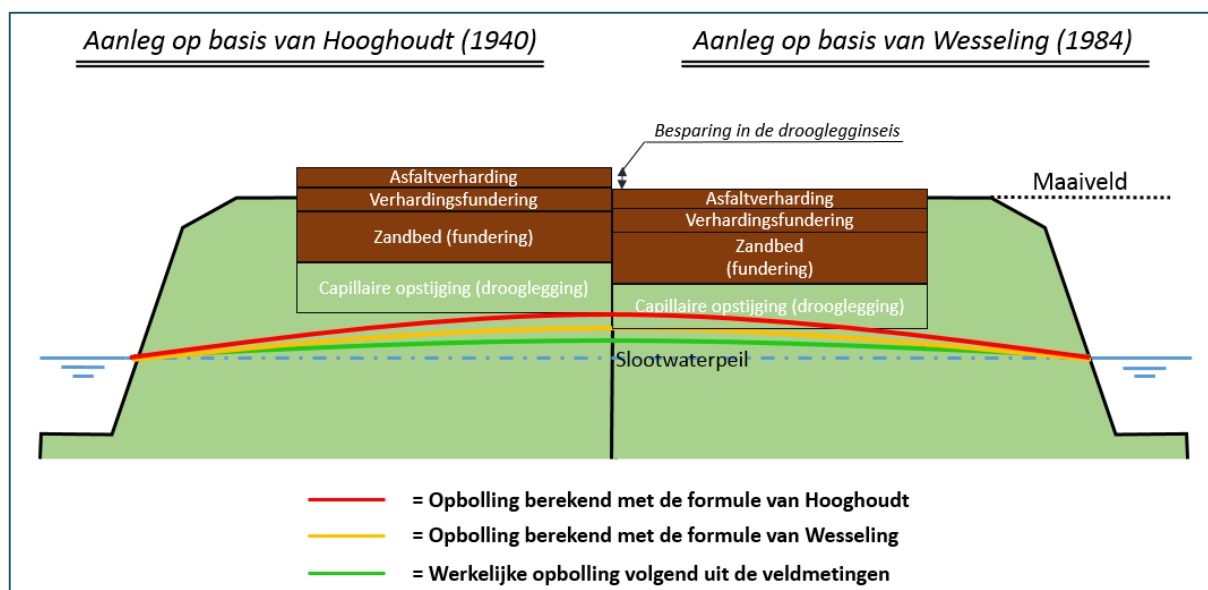
Met behulp van de antwoorden op de onderzoeksvragen kan gekeken worden of de uitkomsten voldoen aan de verwachtingen. Aan het begin van het onderzoek is de volgende hypothese opgesteld: *“De formule van Wesseling geeft een nauwkeurigere beschrijving van de opbolling in vergelijking met de opbolling die zich voor doet in de praktijk, waardoor het mogelijk is om een besparing in de dikte van het wegcunet door te voeren.”* De hypothese kan als juist beschouwd worden, wanneer een bepaalde situatie zich voordoet. Deze situatie heeft als eigenschappen dat er een grote wegverharding is, die de aanvoer van boven minimaliseert, en dat er op deze locatie een redelijk ondiepe grondwaterstand aanwezig is. In de praktijk is dus een besparing van zand voor zandbed mogelijk, zoals weergegeven op de volgende pagina in de Figuren 35, 36 en 37.



Figuur 37: Visualisatie van de besparing exclusief wegontwerp



Figuur 36: Vergrote weergave van de besparing uit Figuur 35



Figuur 35: Visualisatie van de besparing inclusief wegontwerp

7 Discussie

In het vorige hoofdstuk is de conclusie getrokken, dat de formule van Wesseling bij bepaalde eigenschappen in de omgeving de opbolling onder de wegverharding nauwkeuriger bepaald en dat aan de hand van deze opbolling een besparing van zand voor zandbed in het wegcunet gedaan kan worden. In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar de waarde van deze conclusie.

Theoretische studie

Uit de literatuur zijn alle eigenschappen van de parameters in de formules naar voren gekomen. Aan de hand van deze informatie is gekeken naar realistische parameterwaarden. Gekozen is voor parameterwaarden van de locatie van de mislukte metingen te Apeldoorn, waardoor ze gebaseerd zijn op een situatie uit de praktijk. Dit zorgt voor de validiteit in de theoretische studie. Het gebruik van DINOloket (2015) vormt de eerste onzekerheid in het onderzoek. De parameterwaarden voor de doorlatendheden van de ondergrond en de weerstand van de scheidende laag, welke afkomstig zijn van een schatting van DINOloket (2015), zullen door het gebruik van deze informatiebron een kleine afwijking hebben en geven een kleine afwijking in de uitkomst van de berekende opbolling. Wanneer men met deze locatie een vergelijking aan de veldmetingen uit wil voeren, kan dus niet verder gerekend worden met deze parameterwaarden. Voor theoretische doeleinden zal in dit onderzoek echter voldaan worden aan de betrouwbaarheid, omdat in beide formules dezelfde doorlatendheden meegenomen zijn en vooral naar het gedrag van de formules ten opzichte van elkaar is gekeken.

Uit de conclusie volgt, dat de doorlatendheden erg gevoelig parameters in de formules zijn. Daardoor blijkt, dat de middeling die in het onderzoek uitgevoerd is voor de doorlatendheid van Wesseling wellicht een te eenvoudige benadering is van de doorlatendheid. Voor een perfecte berekening van de opbolling aan de doorlatendheden in de ondergrond zal de doorlatendheid van elke afzonderlijke bodemlaag in het freatisch waterpakket bepaald moeten worden. De opbouw van het cunet moet hiervoor ook perfect in beeld gebracht worden. In de toetsing aan de veldmetingen en theoretische analyse bevindt zich dus nog een afwijking in de doorlatendheid, doordat in werkelijkheid de doorlatendheid van de bodem en de eventuele grote verscheidenheid hierin er heel anders uit zal zien. Aangezien de formules zelf niet zo'n gedetailleerde aanpak hebben voor de doorlatendheid voldoet, al is er sprake van een kleine afwijking in de doorlatendheden, de methode zoals uitgevoerd in het onderzoek.

De formule van Wesseling benaderd volgend uit de conclusies de neerslag onjuist. Kijkend naar een geminimaliseerde afvoer van bovenaf kan getwijfeld worden aan het feit of deze conclusie wel klopt. Bij de aanwezigheid van een grote hoeveelheid wegverharding geeft de neerslag, zoals geconcludeerd, een kleine invloed op de opbolling en wellicht maakt dit de benadering van neerslag door de formule van Wesseling in deze situatie juist nauwkeurig. Aangezien er sprake is van een redelijk brede doorlatende middenberm op de locaties van de veldmetingen, zal dit een verklaring kunnen zijn voor de lagere uitkomst van de formule van Wesseling op de derde meetlocatie.

Tot slot blijkt uit de conclusies, dat een schatting van de kwelaanvulling niet betrouwbaar. Dit valt te verklaren, omdat de kwelformule, zoals gebruikt in het onderzoek, deze kwel naar waarschijnlijkheid te eenvoudig benaderd. Er is geen onderzoek gedaan naar een nauwkeurigere formule voor de kwelbepaling. Dit is niet onderzocht, omdat in het onderzoek enkel bepaald moet worden of de formule van Hooghoudt inclusief de kwelaanvulling zorgt voor een nauwkeurigere opbolling onder de wegverharding als de formule van Hooghoudt exclusief kwelaanvulling.

Toetsing aan de veldmetingen

Over de validiteit van de toetsing aan de veldmetingen valt het één en ander op te merken, doordat noodgedwongen gebruik gemaakt is van de locatie van Damveld (2013). Deze locatie bevat namelijk geen ideale eigenschappen voor een toetsing aan veldmetingen voor dit onderzoek. Desondanks is een geschikt interval uit de metingen van Damveld (2013) gevonden om een geldige praktijktoetsing uit te voeren.

Op de meetlocaties is onregelmatige gedrag van de stijghoogtes aanwezig. Er blijkt een nagenoeg constant stijghoogteverschil aanwezig, waardoor de kwel goed te bepalen valt, maar de standaard grondwaterstand is heel gevoelig voor weersomstandigheden. Het grondwaterpeil heeft daardoor op de meetlocaties geen constante waarde gedurende een langere periode, maar het grondwaterpeil daalt op het moment van de metingen van Damveld (2013) continu. Dit maakt het lastig om de specifieke opbolling te herkennen. Daarnaast zorg één enkele neerslagperiode tijdens het onderzoek van Damveld (2013) ervoor dat er geen vergelijkingsmateriaal aanwezig is en slechts één interval getoetst is. Er is dus een kans aanwezig, dat er betreffende de resultaten sprake is van een toevalstreffer. Toch is er wel degelijk sprake van een redelijke benadering aan de opbolling van de formule van Wesseling. In het geval van een toevalstreffer zal namelijk ook voor de formule van Hooghoudt gelden dat er sprake is van een toevalstreffer, omdat hiervoor dezelfde gegevens gebruikt zijn. Op de meetlocaties is echter geen ideale situatie betreffende een, door de wegverharding gecreëerde, geminimaliseerde aanvoer van boven aanwezig. Er is sprake van een redelijk brede open middenberm. Dit verklaart wellicht, waarom bij meetlocatie 3 een lagere uitkomst voor de opbolling van Wesseling gevonden wordt dan bij de veldmetingen.

Stabiliteit van het wegontwerp

Betreffende de stabiliteit van het wegontwerp volgt uit de conclusies, dat een besparing mogelijk is. Aan de hand van de gesprekken met de expert op het gebied van het wegontwerp kan gesteld dat de argumenten en conclusies die bij dit onderdeel van het onderzoek horen betrouwbaar zijn. De vragen die in dit onderzoek niet behandeld zijn, betreffen welke gebieden de mogelijkheid geven tot een besparing, of een besparing op deze locatie bij het aanwezige type weg rendabel is en wat het aantal wegen is, waarop een besparing in het zand voor zandbed van de droogleggingseis mogelijk is.

De factor tijd

In de formules van Wesseling (1984) en Hooghoudt (1940) wordt in de formule geen rekening gehouden met de factor tijd. Er wordt in de formules uitgegaan van één bepaalde situatie gedurende de complete tijd, waardoor de maximale opbolling voor deze situatie uit de berekeningen volgt. Voor een weergave van de berekende opbolling per tijdstap zal een formule gebruikt moeten worden, die de factor tijd als één van de parameters meeneemt.

8 Aanbeveling

In de discussie zijn enkele tekortkomingen aangegeven, die bij verbetering de betrouwbaarheid van het onderzoek versterken. Daarnaast zijn in het onderzoek een aantal interessante bevinden voor vervolgonderzoek gedaan. Aan de hand van de tekortkomingen en de overige bevindingen wordt geadviseerd om nader onderzoek te doen naar de onderdelen uit volgende puntsgewijze weergave:

- *Het uitvoeren van een toetsing aan de hand van veldmetingen op de locatie Kanaal Noord 350 te Apeldoorn voor een definitieve bevestiging van de juistheid van de formule van Wesseling in situaties met kwel.* Hierbij wordt geadviseerd om gedurende alle jaargetijden, dus één heel jaar, metingen uit te voeren en te bepalen of de formule van Wesseling de opbolling op deze locatie op een nauwkeurige wijze benaderd. Voor deze locatie geldt namelijk nu geldt dat de middenberm zo goed als “waterdicht” is, dat deze aan alle benodigde eigenschappen voldoet. Deze langdurige meting biedt ook garantie op voldoende neerslagperioden, wat leidt tot meer mogelijkheden van toetsing en een goede betrouwbaarheid van het onderzoek. Op deze locatie worden de drie negatieve aspecten zoals benoemd in de discussie dus voorkomen.
- *Onderzoek doen naar de invloed van een grote verscheidenheid aan doorlatendheidscoëfficiënten in het freatische waterpakket op de uitkomst van de opbolling.* Dus onderzoeken of het altijd toegestaan is een gemiddelde doorlatendheidscoëfficiënt te berekenen en deze in te vullen in de formules voor de opbolling. Aan de hand van dit onderzoek kan bepaald worden of de doorlatendheid wel of niet nauwkeurig genoeg wordt berekend in dit onderzoek en wordt bepaald of de formules de doorlatendheidscoëfficiënten beter kunnen benaderen.
- *Onderzoek doen naar een formule voor de berekening van de opbolling in een situatie met om en nabij evenveel kwel als neerslag.* Uit Tabel 8 weergegeven in Hoofdstuk 6 “Conclusie” volgt, dat aan de hand van onderzoek achterhaalt moet worden of er een betere formule bestaat of ontwikkelt kan worden voor een situatie met ongeveer evenveel kwel als neerslag. Het onderzoek op de meetlocatie Apeldoorn zorgt wellicht al voor meer inzichten in deze situaties.
- *Het gedetailleerd bepalen van de eigenschappen van de ondergrond aan de hand van een professioneel bodemonderzoek.* Uit het onderzoek volgt de gevoeligheid van de formules voor de doorlatendheid van de ondergrond en de moeilijk te bepalen weerstand van de scheidende laag. Een nauwkeurige bepaling van de bodemeigenschappen van de ondergrond zullen de resultaten van het onderzoek en waarden van de parameters zeer ten goede doen. Wanneer de meetlocatie te Apeldoorn gebruikt zal worden, zal dit onderzoek ook plaats moeten vinden.
- *Onderzoeken of er een verhouding te bepalen valt tussen de kwel en de neerslag, kijkend naar de invloed op de opbolling, waaruit blijkt dat een x aantal millimeters kwel in de formule van Wesseling gelijk staat aan bijvoorbeeld 1 millimeter neerslag in de formule van Hooghoudt.* De kwelaanvulling blijkt uit het onderzoek volgens huidige methoden onjuist, maar er liggen wellicht nog mogelijkheden met een andere methode voor deze kwelaanvulling. Dit vergt wel een nauwkeurige bepaling van het aantal millimeter aanwezig kwel in de ondergrond. Bij het vinden van een nauwkeurige juiste kwelaanvulling, zou de formule van Hooghoudt eventueel omgevormd kunnen worden naar een formule die geschikt is voor alle situaties met opbolling.
- *Het rendement van een dergelijke besparing en het exact aantal geschikte situaties, waar een besparing in de droogleggingseis mogelijk is, bepalen.* Dit betreft een zeer interessant punt om te onderzoeken, omdat inzichtelijk wordt hoeveel geld aan een eventueel nieuwe droogleggingseis verdiend kan worden
- *Het betreft een interessant punt om onderzoek te doen naar een formule die de opbolling berekend en daarbij de factor tijd in zijn formule meeneemt.* Aangezien de factor tijd in dit onderzoek niet wordt meegenomen, is de invloed van de factor tijd nog onbekend.

Bronvermelding

- AHN. (1974). Actuele Hoogtebestand Nederland. Amersfoort, Gelderland, Nederland. Opgeroepen op April 24, 2015, van <http://www.ahn.nl/pagina/viewer.html>
- Bouma, J., Maasbommel, M., & Schuurman, I. (2012). *Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen*. Amersfoort: STOWA.
- Chieng, S.-T., Broughton, R., & Ami, S. (1981). Graphical solutions to drainage equations. *Canadian agricultural engineering* Vol. 23 No. 2, 91 - 92. Opgehaald van http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/23/23_2_91_raw.pdf
- Comissie voor Hydrologisch Onderzoek. (1986). *Verklarende hydrologische woordenlijst*. "s-Gravenhage: CHO-TNO.
- CROW. (2004). *Handboek Zandboek*. Epe: CROW.
- CROW. (2010). *Asfalt in weg- en waterbouw*. Ede: CROW.
- CROW. (2013). *Lichte ophoogmaterialen in de wegenbouw*. Ede: CROW.
- CROW. (2014). *Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw*. Ede: CROW.
- Cultuurtechnische vereniging. (1988). *Cultuurtechnisch Vademecum*. Utrecht: Cultuurtechnische vereniging.
- Damveld, J. (2013). *Onderzoek naar de opbolling van grondwater onder wegen*. Enschede: Universiteit Twente & Aveco de Bondt.
- De Vree, J. (2015). *Poederkoolvliegass*. Opgehaald van Joostdevree: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/poederkoolvliegass.shtml>
- Deltares. (2009). *Leidraad Balans*. Den Haag: StudioWAT.
- DINOloket. (2015). *Ondergrondgegevens en ondergrondmodellen*. Opgehaald van DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/>
- Drecht, G. v. (1997). *Modellen voor diffuse ontwatering in de toplaag*. Bilthoven: RIVM.
- fvb-ffc Constructiv. (2012). *Bouwtechnologie Wegenbouwtechnieken*. Brussel: fvb-ffc Constructiv.
- Google Earth. (2015). Luchtfoto's meetlocatie nabij Rijssen. Opgeroepen op Juni 8, 2015
- Grondwaterformules.nl. (2009). *Ontwatering van een perceel met neerslag en kwel*. Opgehaald van Grondwaterformules.nl: <http://www.grondwaterformules.nl/index.php/formules/perceelsdrainage/perceel-met-kwel>
- Hibbeler, R. (2006). *Sterkteleer*. Amsterdam: Pearson Education Benelux.
- Hooghoudt, S. (1940). No. 7. Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen. *Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond*, 192.
- KNMI. (2014). *Regenintensiteit*. Opgeroepen op Mei 29, 2015, van www.knmi.nl: <http://www.knmi.nl/cms/content/101692/regenintensiteit>
- KNMI. (2015). *Klimaatdata en -advies*. Opgeroepen op Juni 3, 2015

- KNMI. (2015). *Neerslag*. Opgeroepen op Mei 6, 2015, van www.knmi.nl:
<http://www.knmi.nl/cms/content/19233/neerslag>
- Maas, K. (2008). Drainageweerstand en voedingsweerstand van een freatische aquifer. *Stromingen* 14, 8-12. Opgehaald van Kwrwater.
- Meinders, J. (2015). Toepassing kwel op Hooghoudt.
- OCW. (2006). *Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp of onderhoud van wegconstructies*. Brussel: Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw.
- Oosterbaan, R. (1993). *Hooghoudts drainage equation, adjusted for entrance resistance and sloping land*. Wageningen: ILRI.
- Pritchard, P. J. (2010). *Fox and McDonalds's introduction to Fluid Mechanics*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Rijksoverheid. (2015). *Eigenschappen bitumenemulsie, vloeibitumen en asfaltkleefmiddel*. Opgeroepen op 05 05, 2015, van Bodemrichtlijn.nl:
<http://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bitumenemulsie-vloeibitum111051/eigenschappen-bitumenemuls111052>
- Ritzema, H., Heuvelink, G., Heinen, M., Bogaart, P., van der Bolt, F., Hack-ten Broeke, M., . . . Vroon, H. (2012). *Metten en interpreteren van grondwaterstanden*. Universiteit Wageningen. Wageningen: Alterra.
- Sargent, R. (2011). Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, (pp. 183-198).
- Schrootplaza.nl. (2014). *Alternatieve producten wegenbouw*. Opgeroepen op Mei 26, 2015, van Schrootplaza.nl: <http://www.schrootplaza.nl/blog/uncategorized/alternatieve-produkten-wegenbouw/>
- Sectie Weg en Railbouwkunde TU Delft. (2007). Zettingen, stabiliteit, aanleg en ontwatering van de Aardebaan. In T. Delft, CT3041 (pp. 73 - 77). Delft: TU Delft.
- V&W Asfalt. (2010). *Asfalt en bitumendag 2010*. Opgehaald van Asfaltblij.nl:
<http://www.asfaltblij.nl/media/1436/2010-oia-ontwerpinstrumentarium-asfaltverhardingen.pdf>
- Van de Gevel, J. (2015, Mei 6). Methodiek ontwerpen en toetsen van de wegconstructie. (M. C. Asschert, Interviewer)
- Van der Gaast, J., & Massop, H. (2003). *Spreidingslengte voor het beheersgebied van Waterschap Veluwe*. Wageningen: Alterra. Opgehaald van <https://www.wageningenur.nl/nl/Publicatie-details.htm?publicationId=publication-way-333231323533>
- Van der Velden, J. (2004). *Wegenbouwkunde*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Van Dreven, F., van der Gugten, R., de Jong, F., van Lammeren, R., Loedeman, J., Mostert, G., . . . Vergouwen, M. (2000). *Cultuurtechnisch vademecum*. Doetinchem: Elsevier.
- Verbunt, E.-J. (2015). *Bodemas als grondstof*. Opgeroepen op Mei 26, 2015, van veenigingafvalbedrijven.nl:

<http://www.verenigingafvalbedrijven.nl/afvalmanagement/energie-uit-afval/bodemas-als-grondstof.html>

Vree, J. d. (2015). *Cunet, Cunette*. Opgehaald van Joostdevree.nl:
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/cunet.shtml>

Waterschap Vallei en Veluwe. (2005). *Apeldoorns waterplan 2005 - 2015*. Apeldoorn: Gemeente Apeldoorn. Opgehaald van
http://www.apeldoorn.nl/DATA/TER/docs/politiek/plannen_projecten/beken_sprengen/waterplan_2005-2015.pdf

Waterschap Vechtstromen. (2015). *Kengetallen Waterschap Vechtstromen*. Opgehaald van Website van Waterschap Vechtstromen: <http://www.vechtstromen.nl/organisatie/>

Wesseling, J., & Wesseling, J. (1984). The influence of seepage on the depth of water tables in drainage. *Journal of Hydrology* 73, 289 - 297.

Whitman, R. V., & Lambe, W. T. (1969). *Soil Mechanics*. Verenigde Staten: John Wiley & Sons Inc.

Winters, G. (2015, April 24). Gedragingen waterhuishouding meetlocatie Apeldoorn. (M. C. Asschert, Interviewer)

Inhoudsopgave bijlagen

Bijlage A: Locatiebeschrijving	61
A.1 Meetlocatie	61
A.2 Onderzoek geschikte meetlocatie	62
A.3 Bodemonderzoek	63
A.4 Verkeersmaatregel bij meetlocatie weg Kanaal Noord	67
Bijlage B: Inmeet methode	68
B.1 Bepalen en definiëren van een stijghoogte	68
B.2 Aandachtspunten bij plaatsing peilbuizen	69
B.3 Toelichting meetopstelling	70
B.4 Inmeten N.A.P. Hoogtes	72
B.5 Waterpassing	72
Bijlage C: Toetsingsmethodes op locatie	73
Bijlage D: Resultaten veldmetingen middenberm	74

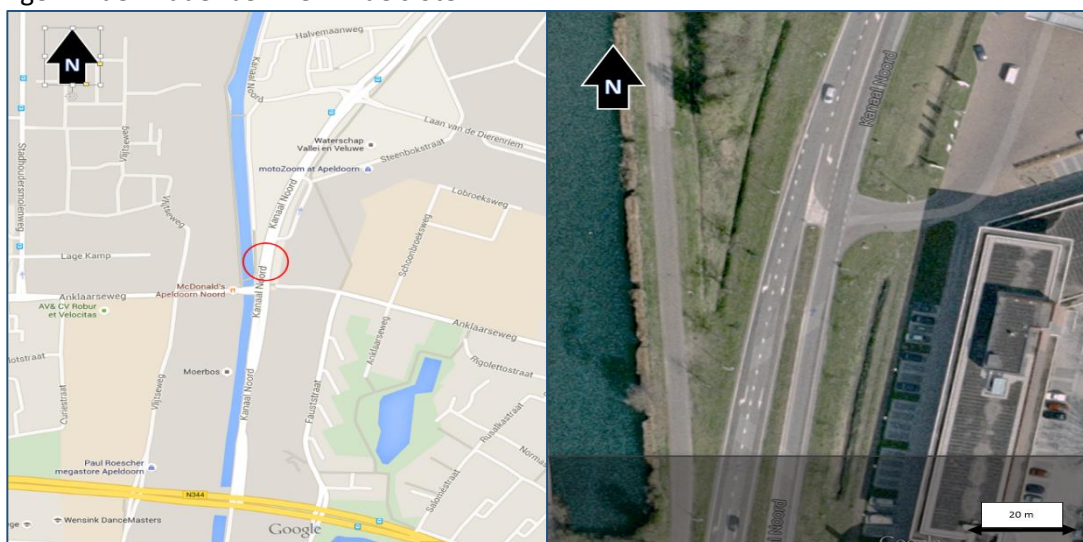
A Bijlage A

A Locatiebeschrijving

In deze bijlage zijn alle eigenschappen van de locatie Kanaal Noord 350 te Apeldoorn beschreven. In de volgende volgorde zijn de meetlocatie, het onderzoek naar de geschiktheid van de meetlocatie, het bodemonderzoek en de benodigde verkeersmaatregelen op de locatie behandeld.

A.1 Meetlocatie

De meetlocatie bevindt zich op de weg Kanaal Noord te Apeldoorn nabij het adres Kanaal Noord 350. Het stuk weg wat geschikt bevonden is voor het uitvoeren van de meting bevindt zich, zoals te zien in Figuur 38 en Figuur 39 vlak voor een kruispunt en bestaat uit twee rijbanen. Aan de westzijde bevindt zich een rijbaan met twee rijstroken en aan de Oostzijde bevindt zich een rijbaan met één rijstrook. Naast de weg ligt aan beide zijden een sloot. Daarnaast ligt aan de westzijde ook nog een fietspad met een fietsstrook voor beide richtingen en naast dit fietspad ligt wederom aan de westzijde het Apeldoorns kanaal. Ten Oosten van de meetlocatie bevindt zich het bedrijvenpark Apeldoorn Noord. Uit een KLIC-Melding van het Kadaster blijkt dat er geen hinder ondervonden wordt van kabels en leidingen in de middenberm en in de sloten.



Figuur 38: Boveraanzichten meetlocatie uit de meetmethode



Figuur 39: Vooraanzicht meetlocatie uit de meetmethode

A.2 Onderzoek geschikte meetlocatie

Gezien de locaties van waaruit gewerkt wordt, Amersfoort en Rijssen, blijkt Apeldoorn een goede locatie om te gaan zoeken naar een meetlocatie. Omdat Apeldoorn dichtbij de Veluwe ligt en dus ook wat hoger gelegen is, is er ook het vermoeden dat de kwel hier niet of nauwelijks aanwezig is en wordt dus al rekening gehouden met de meest uitdagende eis. Nader onderzoek moet natuurlijk uitwijzen of het vermoeden over de kwel juist is.

Na enige oriëntatie in Apeldoorn via Google Maps en via een bezoek met de auto zijn er drie mogelijke locaties gevonden:

1. Woudhuizemark 100 te Apeldoorn (Figuur 40)
2. Oost Veluweweg doorlopend in Kanaal Noord te Apeldoorn (Figuur 41)
3. Brinkenweg 126 te Apeldoorn (Figuur 42)



Figuur 40: Woudhuizemark 100



Figuur 41: Oost Veluweweg/Kanaal Noord



Figuur 42: Brinkenweg 123

A.2.1 Validatie eis 1 en 2

Aan de hand van deze drie locaties is een keuze gemaakt voor een locatie waar als eerste het bodemonderzoek, om eis 3 te valideren, gedaan gaat worden. Deze keuze is gemaakt aan de hand van eis 1 en 2, welke gemakkelijk te bepalen zijn aan de hand van Google Maps en het bezoeken van de locaties.

Alle drie de locaties bevatten aspecten van eis 1 en 2. Echter springt één van de locaties eruit en dat is locatie nummer 2. In het specifiek de locatie Kanaal Noord 350 net voor de kruising. Er is een zeer betrouwbare bron van oppervlaktewater aanwezig, namelijk het Apeldoorns Kanaal, aan weerszijden zitten sloten en het wegoppervlak is erg groot. Twee maal twee rijstroken met daarnaast nog een fietspad. Bij locatie 1 is ook een erg betrouwbare sloot met oppervlaktewater aanwezig en het nadeel van locatie 3 is dat de sloten droog staan. Daarnaast is de oppervlakte aan wegverharding bij locatie 1 en 3 beduidend kleiner.

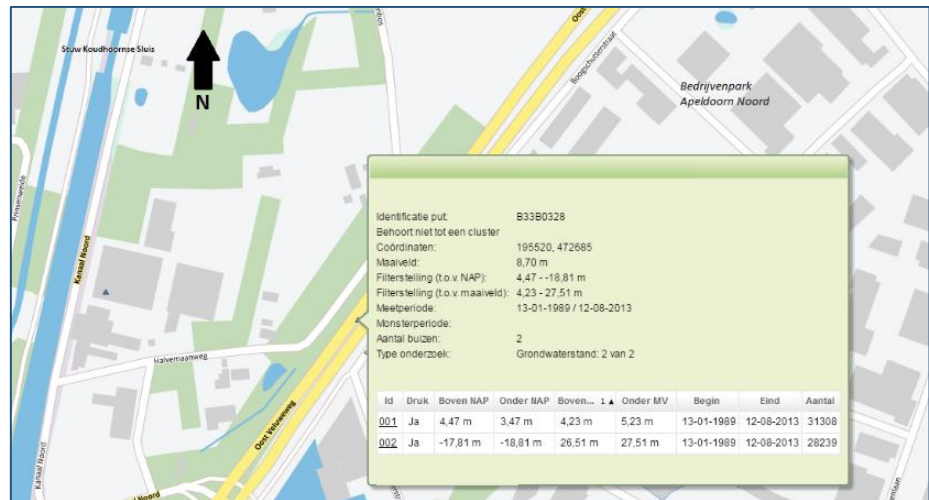
Nog een aspect wat in het voordeel van locatie 2 speelt zijn de beschikbare gegevens in de omgeving. Nabij gelegen, ongeveer 300 meter ten noorden, is een puilbuis van het waterschap aanwezig. Daarnaast zijn oppervlaktewaterstanden van het Apeldoorns Kanaal bij de stuw Koudhoornse Sluis beschikbaar.

A.2.2 Validatie eis 3

Uit paragraaf A.2.1 is gebleken dat op basis van eis 1 en 2, locatie 3 op de weg Kanaal Noord het meest geschikt is. Echter is het van belang dat ook voldaan wordt aan eis 3 en in deze paragraaf zal deze eis gevalideerd gaan worden, waarna een definitieve conclusie getrokken kan worden over de geschiktheid van locatie nummer 3.

Peilbuis

Zoals in Paragraaf A.2.1 genoemd, bevindt er zich op 300 meter ten noorden van locatie 3 een peilbuis van het waterschap in de middenberm van de Oost Veluweweg, de verlengde van de Kanaal Noord. In Figuur 43 is, afkomstig van DINOlaket (2015), een kaartje met de locatie en de gegevens weergegeven.



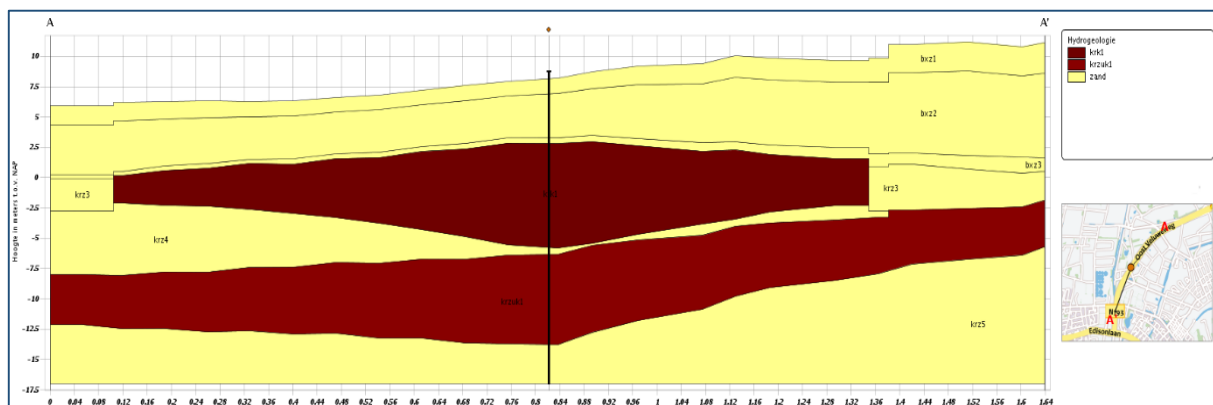
Figuur 43: Locatie en gegevens peilbuis (DINOlaket, 2015)

Deze peilbuis kan gaan helpen bij het bepalen van kwel tussen ondergrondse lagen. In Bijlage A.3 is uitgebreid onderzoek gedaan naar de structuur van de ondergrond. Hier zal meer informatie over de peilbuis van het waterschap naar voren komen en worden toegelicht.

Aan de hand van het bodemonderzoek kan geconcludeerd worden dat er kwel op de locatie aanwezig is. Echter is ook geconcludeerd, dat deze kwel bepaald kan worden. Aan de hand van de vele beschikbare gegevens en het advies van de waterexpert is dan ook besloten dat aan eis nummer 3 voldaan kan worden en dat locatie nummer 3 aan alle eisen voldoet. Locatie nummer 3 is dus de meetlocatie die gebruikt kan worden voor het uitvoeren van de metingen.

A.3 Bodemonderzoek

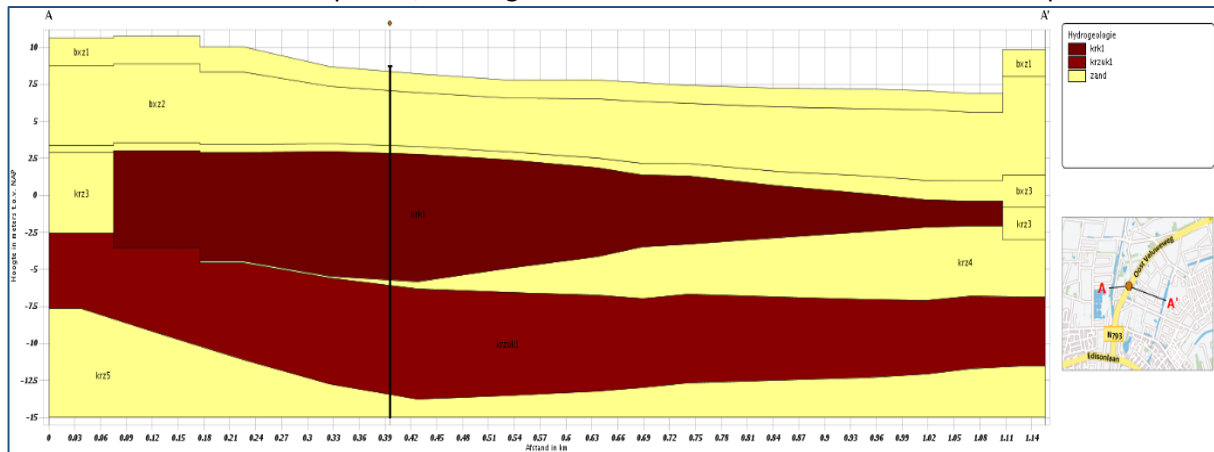
Met behulp van DINOlaket (2015) zijn gegevens verzameld over de ondergrond op de betreffende locatie. Er is ten eerste aan de hand van de doorsnede functie bij de ondergrondmodellen van DINOlaket (2015) een doorsnede gemaakt parallel met de weg. Deze doorsnede is gegeven in Figuur 44. In Figuur 45 is de doorsnede loodrecht op de weg gevormd vanaf de Stuw Koudhoornse Sluis via de peilbuis van het waterschap naar het achterliggende bedrijvenpark Apeldoorn Noord. De verticale zwarte lijn in Figuur 44 en Figuur 45 weergeeft de locatie van de peilbuis van het waterschap.



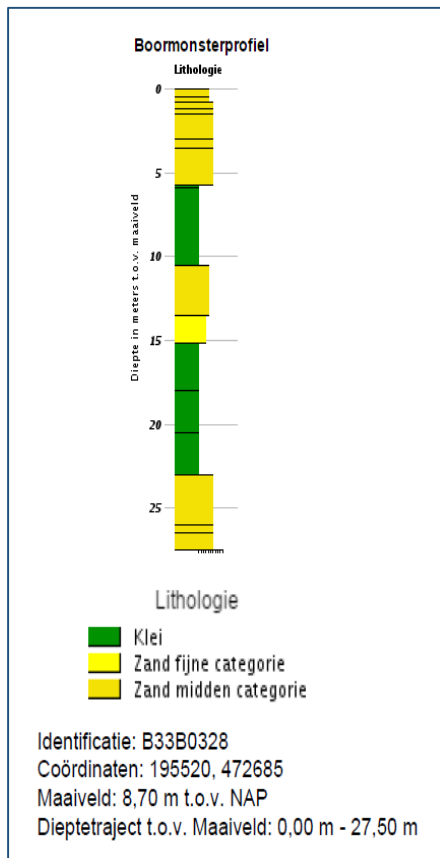
Figuur 44: Doorsnede ondergrond parallel met Oost Veluweweg

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

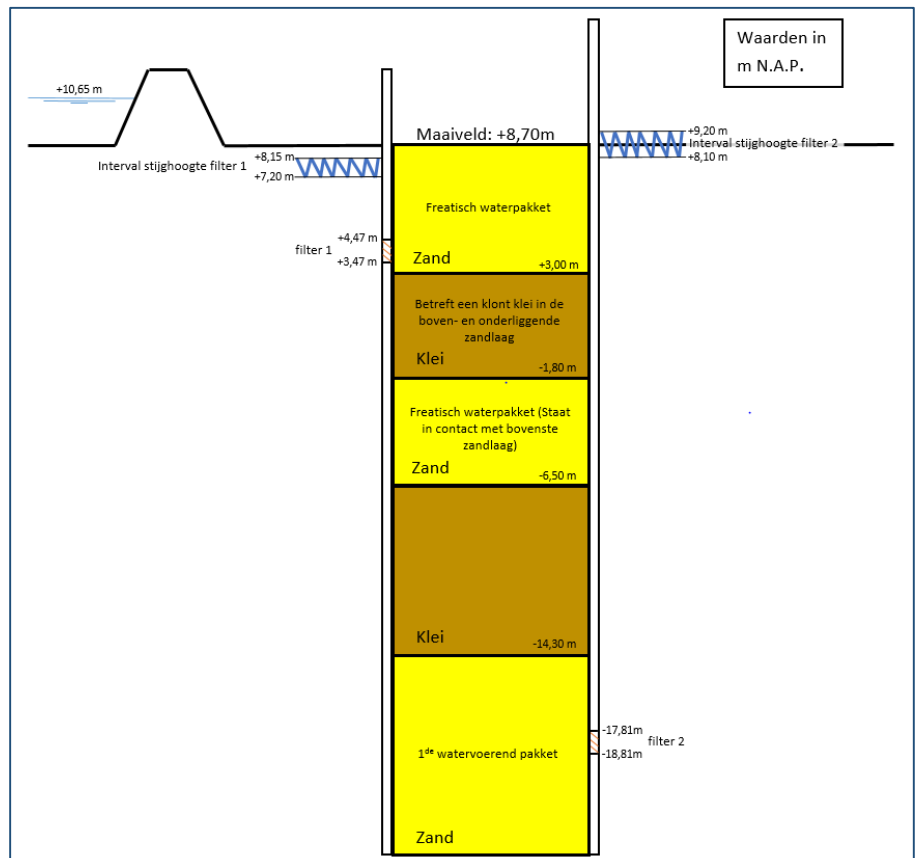
Aan de hand van deze ondergrondgegevens is er een duidelijk overzicht verkregen van de ondergrondse lagen. Wat opvalt, is dat er twee kleilagen aanwezig zijn, waarvan de bovenste kleilaag gezien kan worden als een klont klei in de omringende zandlaag. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de eerste kleilaag niet werkt als een scheidende laag en de omringende zandlagen gedefinieerd kunnen worden als het freatisch waterpakket. De tweede kleilaag werkt wel door in het complete geheel en zal gedefinieerd worden als de scheidende laag. Onder deze scheidende laag bevindt zich weer een zandpakket, welke gedefinieerd wordt als het 1^{ste} watervoerend pakket.



Figuur 45: Doorsnede ondergrond haaks op Oost Veluweweg



Figuur 46: Boormonsterprofiel op locatie peilbuis Waterschap (DINOloket, 2015)

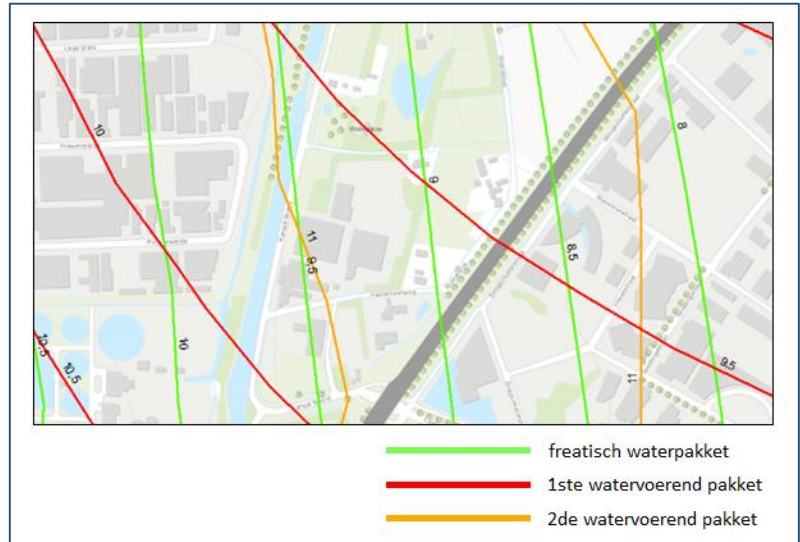


Figuur 47: Schematisatie peilbuisfilters en ondergrond

De aanwezigheid van een scheidende kan duiden op een situatie met kwel. Om dit te achterhalen kunnen we de gegevens van de peilbuis van het Waterschap gebruiken. De ondergrond ter plaatse van de peilbuis met zijn filters is weergegeven op de vorige pagina in Figuur 46 en Figuur 47. De filters bevinden zich in het freatisch waterpakket en in het 1^{ste} watervoerend pakket, waardoor aan de hand van de stijghoogtes gekeken kan worden of er kwel aanwezig is. In Figuur 47 zijn de intervallen van de stijghoogtes gegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er kwel aanwezig is. Het filter in het 1^{ste} watervoerend pakket, filter 2, zorgt namelijk voor een grotere stijghoogte dan het filter in het freatisch waterpakket, filter 1.

A.3.1 Isohypsens

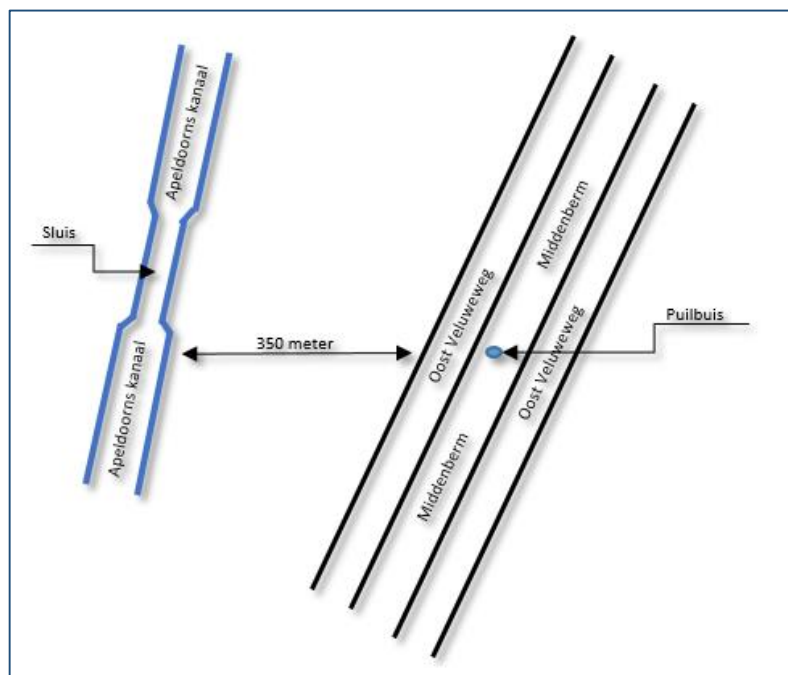
In Figuur 48 zijn de isohypsens rondom de meetlocatie gegeven. Isohypsens beschrijvend de stijghoogtes in de watervoerende pakketten. De isohypsens bevestigen de uitkomsten van de metingen in de peilbuis van het Waterschap, want ook hier wordt een grotere stijghoogte in het 1^{ste} watervoerend pakket weergegeven dan in het freatisch waterpakket. Er kan dus geconcludeerd worden dat er kwel plaats vindt.



Figuur 48: Isohypsens rond de meetlocatie (DINOloket, 2015)

A.3.2 Apeldoorns Kanaal

Een andere factor die invloed uit kan oefenen op de metingen is het Apeldoorns Kanaal. Zoals in Figuur 49 aangegeven ligt deze op om en nabij 350 meter afstand van de peilbuis van het Waterschap. Na aanleiding van een gesprek met de waterexpert Gerhard Winters van Aveco de Bondt is geconcludeerd dat het Apeldoorns Kanaal een verwaarloosbare invloed heeft. Volgens Winters (2015) mag er vanuit gegaan worden dat een kanaal redelijk waterdicht is en de afstand van het kanaal tot de peilbuis is zo groot dat enige kwel niet of nauwelijks tot de peilbuis zal reiken.



Figuur 49: Bovenaanzicht schematisatie locatie Apeldoorns Kanaal

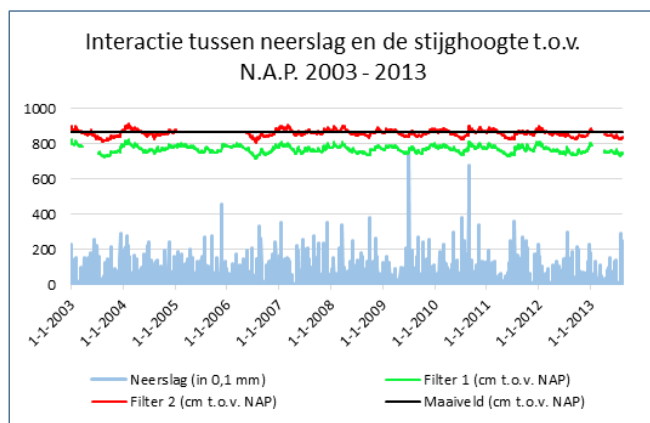
A.3.3 Interactie tussen stijghoogten en de neerslag

Een belangrijk aspect van de peilbuis betreft de reactie die deze levert na een regenbui. Hierdoor kan waargenomen worden hoe snel infiltratie plaatsvindt in de verschillende lagen en welke invloed een aanvoer van bovenaf levert op de stijghoogtes. In Excel zijn hiervoor grafieken gemaakt, waarbij de neerslag uitgezet is tegen de stijghoogtes van de twee filters. De neerslaggegevens zijn afkomstig van KNMI (2015) en de stijghoogtes zijn afkomstig van DINOLoket (2015).

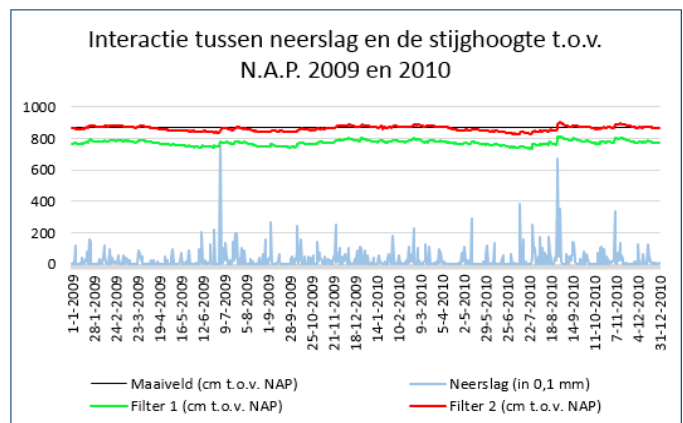
Uit de grafieken van de Figures 50, 51 en 52 kan gehaald worden dat de neerslag de stijghoogtes beïnvloeden. Wat opvallend is, is dat er niet of nauwelijks een vertraging zit tussen filter 1 en filter 2. In het 1^{ste} watervoerend pakket vindt een reactie dus bijna even snel plaats als in het freatisch waterpakket. Gerhard (2015) verklaard dat dit mogelijk is, omdat de neerslag die op de oppervlakte valt een grote druk af geven. Daarom zal bijna direct een reactie te zien zijn in de stijghoogtes. Daarbij geeft een diepteverschil van 15 meter met een scheidende laag van een aantal meters erin bijna geen vertraging.

A.3.4 Conclusie bodemonderzoek

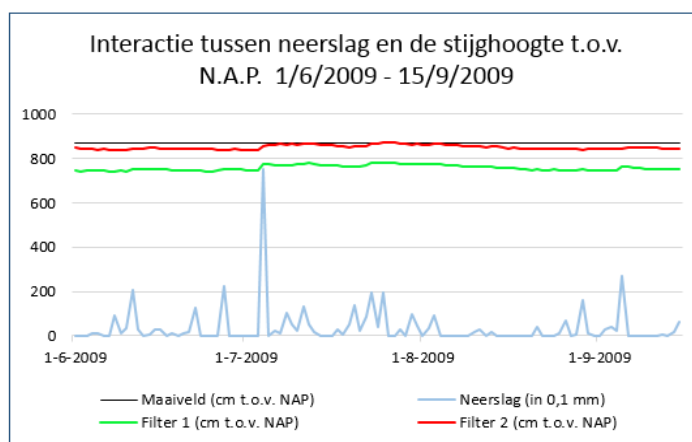
Na het bodemonderzoek kan geconcludeerd worden dat er kwel aanwezig is op de meetlocatie. Echter is de vraag hoe groot deze kwel is. Na het voorleggen van de feiten aan de waterexpert Gerhard Winters is er tot de conclusie gekomen dat deze kwel te berekenen valt en dus gecompenseerd kan worden in de berekening. (Winters, 2015)



Figuur 50: Algemeen overzicht stijghoogten (2003-2013)



Figuur 52: Overzicht stijghoogten 2009 en 2010

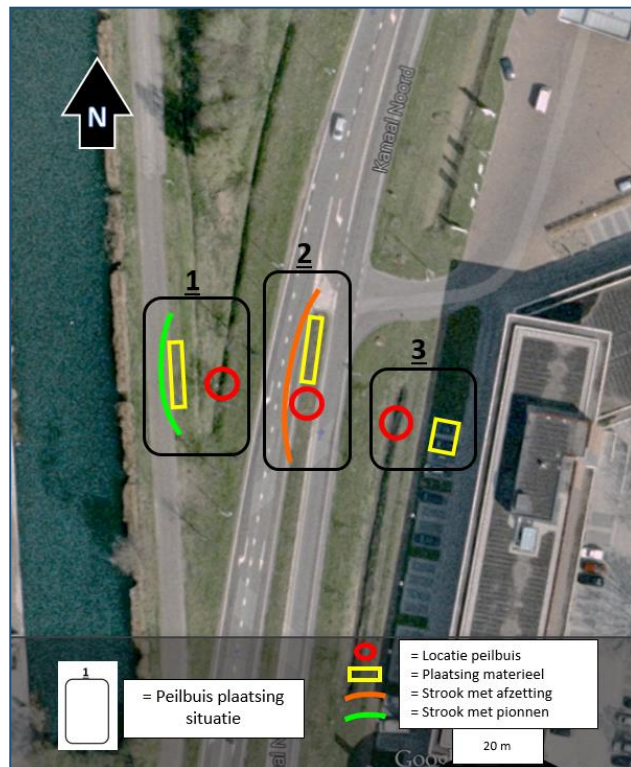


Figuur 51: Overzicht stijghoogten 1/6/2009 - 15/9/2009

A.4 Verkeersmaatregel bij meetlocatie weg Kanaal Noord

Betreffende de meetopstelling is door de verkeerscoördinator Wim Berends van de gemeente Apeldoorn bevonden dat de plaatsing van de peilbuis in de middenberm niet zonder afzetting gedaan kan worden. De situatie is dus als te onveilig beschouwd. Om veiligheid te garanderen zal er een professionele afzetting geregeld moeten worden via een bedrijf als TrafficService Nederland. Een schematisatie van de afzetting en plaatsing van het materieel zoals deze toegepast moet worden is weergegeven in Figuur 53.

Daarnaast moet er rekening gehouden worden met de betonlaag van 50 tot 70 centimeter die in de middenberm ligt op de betreffende meetlocatie. Dit is het enige aspect waar nog geen maatregelen voor gevonden zijn en die eventueel nog op papier gezet zouden moeten worden. Wellicht heeft dit nog een effect op de verkeersafzetting.



Figuur 53: Verkeersmaatregelen weg Kanaal Noord

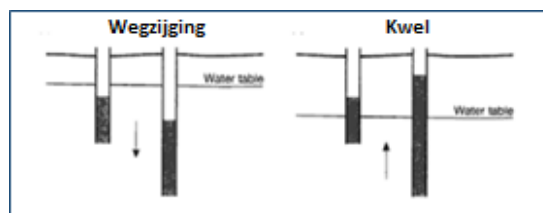
B Bijlage B

B Inmeet methode

B.1 Bepalen en definiëren van een stijghoogte

In de meeste gevallen is er in de ondergrond sprake van waterbeweging. Er worden door Ritzema, et al. (2012) twee soorten ondergrondse waterbeweging weergegeven: wegzijging en kwel. Wegzijging staat voor neerwaarts gerichte waterstroming en de kwel staat in dit geval voor de opwaarts gerichte waterstroming. De waterbewegingen ontstaan door een bepaalde druk die in de ondergrondse lagen heerst. Wanneer er drukverschil aanwezig is tussen de verschillende lagen en er dus ondergrondse waterbewegingen aanwezig zijn spreekt men ook wel van een niet-hydrostatisch evenwicht.

In Figuur 54 zijn de twee soorten waterbewegingen gegeven aan de hand van stijghoogtes. Ritzema, et al. (2012) definieert het begrip stijghoogte als volgt: “de afstand tussen de grondwaterspiegel en een gekozen referentievlak (N.A.P.²⁶).” Deze waarde kan onder N.A.P. en boven N.A.P. liggen en dus zowel negatief als positief zijn.



Figuur 54: Situatie wegzijging (links); situatie kwel (rechts): opwaartse stroming (Ritzema, et al., 2012)

Een stijghoogte wordt gemeten in een peilbuis. Deze peilbuizen kunnen worden geplaatst nadat een grondboring plaats heeft gevonden. Vervolgens zal de peilbuis in het gat van de boring geplaatst worden. De peilbuis bestaat uit een buis van bijvoorbeeld HDPE of PVC materiaal met daarin geplaatst een filter²⁷. (Bouma, Maasbommel, & Schuurman, 2012) Via het filter kan water naar binnen stromen en aan de hand van de bepaalde grondwaterdruk die heerst, zal het waterniveau in de peilbuis bepaald worden. Dit ontstane waterniveau betreft de stijghoogte.

De situatie wegzijging valt als volgt te verklaren. In de situatie wegzijging zal sprake zijn van een uniforme homogene ondergrond. Doordat in deze gehele ondergrond dezelfde grondlaag, bijvoorbeeld zand, zit, zal er geen verschil in grondeigenschappen zijn. De stijghoogtes zullen ook niet boven de freatische grondwaterstand uitkomen en een neerwaartse stroming is mogelijk. Dit wordt verklaard, doordat er onvoldoende waterdruk van onderaf aanwezig is om het gewicht van de bovenliggende grondlaag te compenseren en een opwaartse kracht te creëren. (Ritzema, et al., 2012)

Bij kwel zal volgens Ritzema, et al., 2012 de tegenovergestelde situatie plaats vinden als bij wegzijging. De stijghoogtes zullen boven de freatische grondwaterstand uitkomen. Dit verklaard de opwaartse stroming. Oorzaken als vroegere stuwwallen en verschillende soorten grondlagen zijn hier een verklaring voor. Een kleilaag heeft namelijk een veel hogere dichtheid en gewicht. Het water kan moeilijk omhoog komen en er wordt een druk onder de kleilaag in de onderliggende laag gecreëerd, omdat de waterdruk deze blijvende kracht omhoog blijft geven. Deze situatie ontstaat als deze laag beter doorlatend is. Dus een situatie waarin een kleilaag een zandlaag afdekt. Door de kleilaag zal in deze situatie langzaam grondwater omhoog stromen. (Whitman & Lambe, 1969)

²⁶ Noord Amsterdams Waterpeil

²⁷ Geperforeerd gedeelte in de buis

B.2 Aandachtspunten bij plaatsing peilbuizen

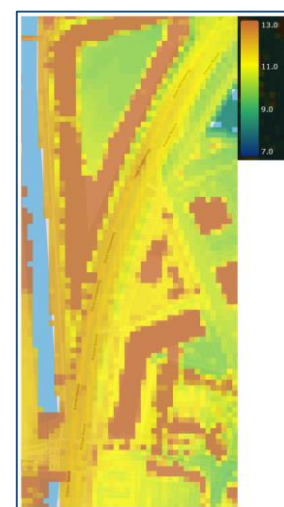
Nadat een beargumenteerde keuze gemaakt is voor de meetlocatie is het van belang dat goed gekeken wordt naar de benoemde aandachtspunten van Bouma, Maasbommel & Schuurman (2012). Deze aandachtspunten zijn van belang bij het uitzoeken van de exacte locaties voor de peilbuizen op de gekozen meetlocatie. Deze zullen in deze paragraaf dan ook stuk voor stuk behandeld worden.

Locatieselectie op basis van ruimtelijke variatie van grondwaterstanden

Bij het plaatsen van peilbuizen moet men opletten op factoren die de lokale grondwatersituatie aan kunnen passen. Deze objecten of situaties moeten dus vermeden worden om zo een meetfout te voorkomen. Factoren en objecten die een invloed uitoefenen op de lokale grondwaterstand zijn bijvoorbeeld grondwateronttrekkingen, wegen, bomen en woningen. Een goede evaluatie van de omgeving is dus van belang. Daarnaast moet bepaald worden welke factoren als negatief beschouwd kunnen worden. Verharding is in dit onderzoek bijvoorbeeld juist een factor die aanwezig moet zijn.

Hoogteligging

Een peilbuis moet niet in kuilen of lokale hoogtes geplaatst worden. Dit kan een fout in de meting opleveren. Bij plaatsing van een peilbuis in een kuil kan oppervlaktewater namelijk deze peilbuis instromen. Op de meetlocatie zelf heerst een vrij constante hoogte van het maaiveld. Figuur 55 toont wel aan dat er een verlaging van het Maaiveld optreedt richting het noordoosten. Echter is op de locatie zelf een constante maaiveldhoogte te zien. Twee peilbuizen zullen wel in een “kuil” geplaatst worden. Namelijk in de sloten naast de weg, maar deze waterstanden zijn benodigd, dus betreft het een bewuste keuze.



Figuur 55: Hoogtekaart locatie 3 (AHN, 1974)

Watergangen

Een watergang kan een drainerende of infiltrerende invloed hebben op de grondwaterstand. Aangezien in het onderzoek watergangen van belang zijn betreft het wederom een bewuste keuze om hier in de buurt te zitten. Het Apeldoorns Kanaal bevindt zich, zoals eerder vermeld, op een juiste afstand en zal geen meetfout leveren.

Grondwateronttrekkingen

Grondwateronttrekkingen kunnen zorgen voor een verlaging van de grondwaterstand en dus een meetfout creëren. Uit een rapport van het Waterschap Vallei en Veluwe blijkt echter dat alleen in het zuidwesten van Apeldoorn grondwateronttrekkingen plaats vinden. Dit is op een grote afstand van de meetlocatie die in het noordoosten ligt. Deze grondwateronttrekkingen hebben dus geen invloed op de metingen. (Waterschap Vallei en Veluwe, 2005)

Verharding

Kijkend naar verharding is de wegverharding geen probleem, aangezien het hier om draait in het onderzoek. Wel dient rekening gehouden te worden, dat de peilbuizen op een afstand van minimaal 10 meter van de bebouwing dient te worden. Dit valt echter simpel op te lossen aangezien zich binnen 10 meter van de meetlocatie niet of nauwelijks bebouwing bevindt.

Verdamping

Grote bomen kunnen ervoor zorgen dat er meer verdamping plaatsvindt en dat de grondwaterstand dus lager uitvalt. Ze onttrekken namelijk veel water uit de grond en vanuit de bladeren verdampt dit water. De eis wordt gesteld om een peilbuis minimaal 15 meter vanaf een grote boom te plaatsen,

want vanaf 15 meter is het effect niet meer merkbaar. Op de meetlocatie zal hiermee rekening gehouden worden.

Drainage en lokale aanvoer

Met drainage en lokale aanvoer is rekening gehouden kijkend naar de beargumentering rondom het Apeldoorns Kanaal en het verdere bodemonderzoek uit Bijlage A.

Terugvindbaarheid

Om de terugvindbaarheid te garanderen wordt een koker gebruikt voor de peilbuis in de middenberm. Voor de peilbuizen in de sloten worden ter bescherming perkoenpalen geplaatst. Deze zorgen voor een terugvindbaarheid en tegelijkertijd bescherming tegen eventuele machines die de sloten maaien.

Bereikbaarheid en veiligheid

Voor de bereikbaarheid en veiligheid wordt tijdens de plaatsing en controles een verkeersmaatregelplan opgesteld. Deze maatregel is te vinden in Bijlage A.4. Vooral bij de plaatsing in de middenberm zal rekening gehouden worden met de veiligheid. Een afzetting met pionnen zal plaatsvinden en aan de gestelde regels van de Gemeente Apeldoorn zal worden voldaan. De verkeersmaatregelen zullen ter controle doorgespeeld worden aan de verkeerscoördinator van de Gemeente Apeldoorn. Daarnaast moet materiaal goed opgesteld worden en zal juiste kleding voor de situatie gedragen moeten worden.

B.3 Toelichting meetopstelling

In Figuur 56 op de volgende pagina is een doorsnede gegeven van de meetopstelling. Uit deze doorsnede valt op te merken dat er drie soorten van plaatsing zijn. Er is een peilbuis met de grootste diepte voor in de middenberm. Er is een peilbuis voor het meten van de grondwaterstand onder de sloot en tot slot is er een peilbuis die het slootwaterpeil zal meten. Beginnend bij de algemene maatregelen die toegepast moeten worden bij plaatsing van de peilbuis. (Bouma, Maasbommel, & Schuurman, 2012)

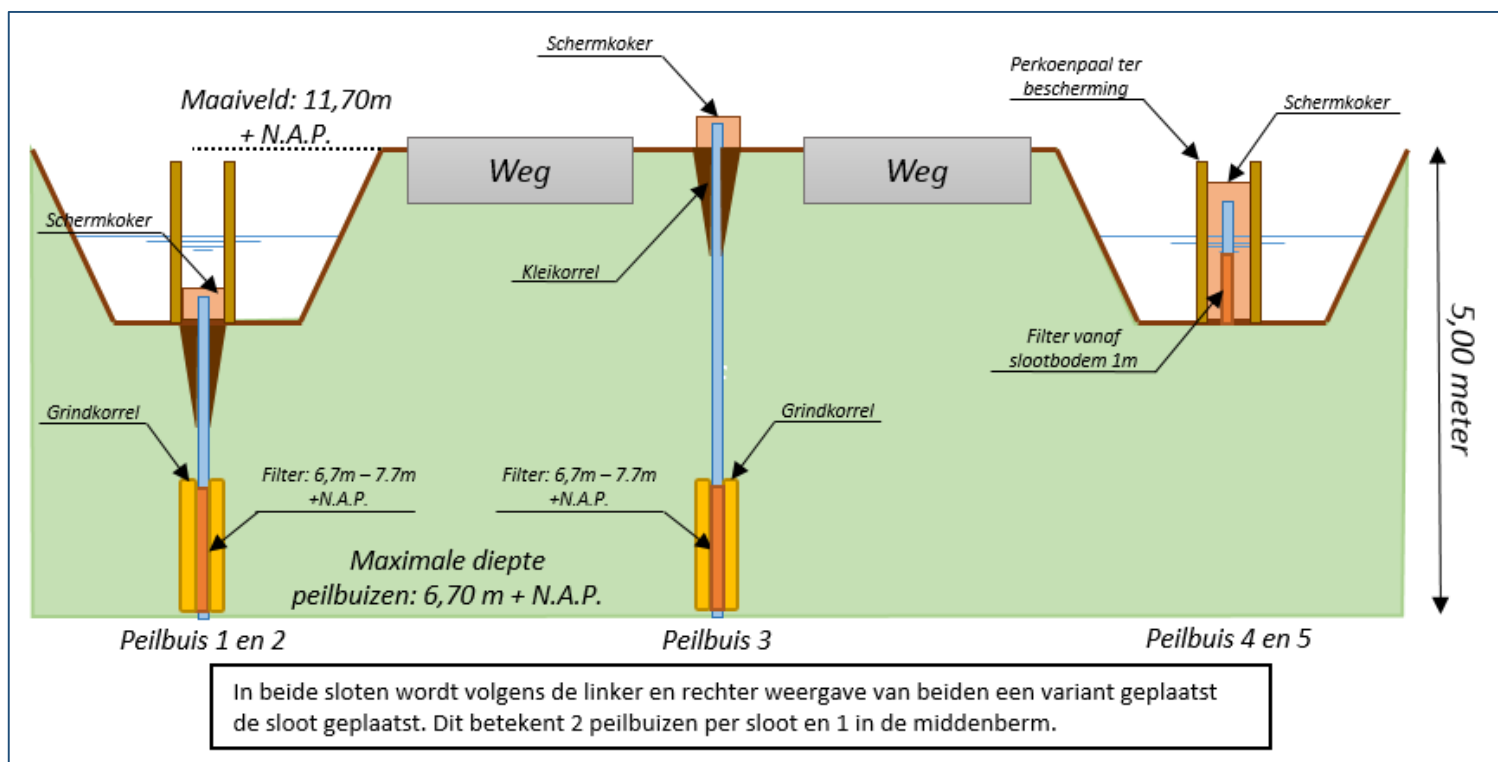
- Het filter²⁸ zal minimaal onder de rand van het grondwaterpeil geplaatst worden en zal moeten worden voorzien van een filterkous, zodat sediment het filter niet verstopt.
- Grindkorrels moeten rond het filter geplaatst worden, zodat het aanwezige water een goede weg richting het filter af kan leggen.
- Rondom de peilbuis nabij het maaiveld worden kleikorrels aangebracht om te voorkomen dat het water langs de peilbuis het filter in stroomt.
- Een schermkoker wordt gebruikt ter beveiliging van het materiaal tegen diefstal en eventueel grasmaaien van bermen en sloten. De perkoenpalen in de sloten geven een extra stuk veiligheid voor maaiwerkzaamheden.
- De diepte van de filters betreffende grondwaterstand worden geplaatst op een diepte van 6,7 – 7,7 meter +N.A.P. Deze diepte volgt uit de bepaalde fluctuatie van de grondwaterstand tussen 7,20 – 8,15 meter +N.A.P. van Bijlage A.3. Hierdoor zal een deel van het filter zich altijd ten hoogte van de grondwaterstand bevinden.

Zoals uit de meetopstelling te halen valt wordt er gebruik gemaakt van twee peilbuizen voor in elke sloot. Eén zal de grondwaterstand meten wanneer de sloot droog komt te staan en de andere peilbuis zal het waterpeil in de sloot meten. Bij deze laatste peilbuis voor het meten van het waterpeil in de sloot moet extra aandacht besteedt worden aan de plaatsing. Ook betreft de plaatsing extra voorbereiding. In Figuur 57 zijn een doorsnedeaanzicht en bovenaanzicht weergegeven

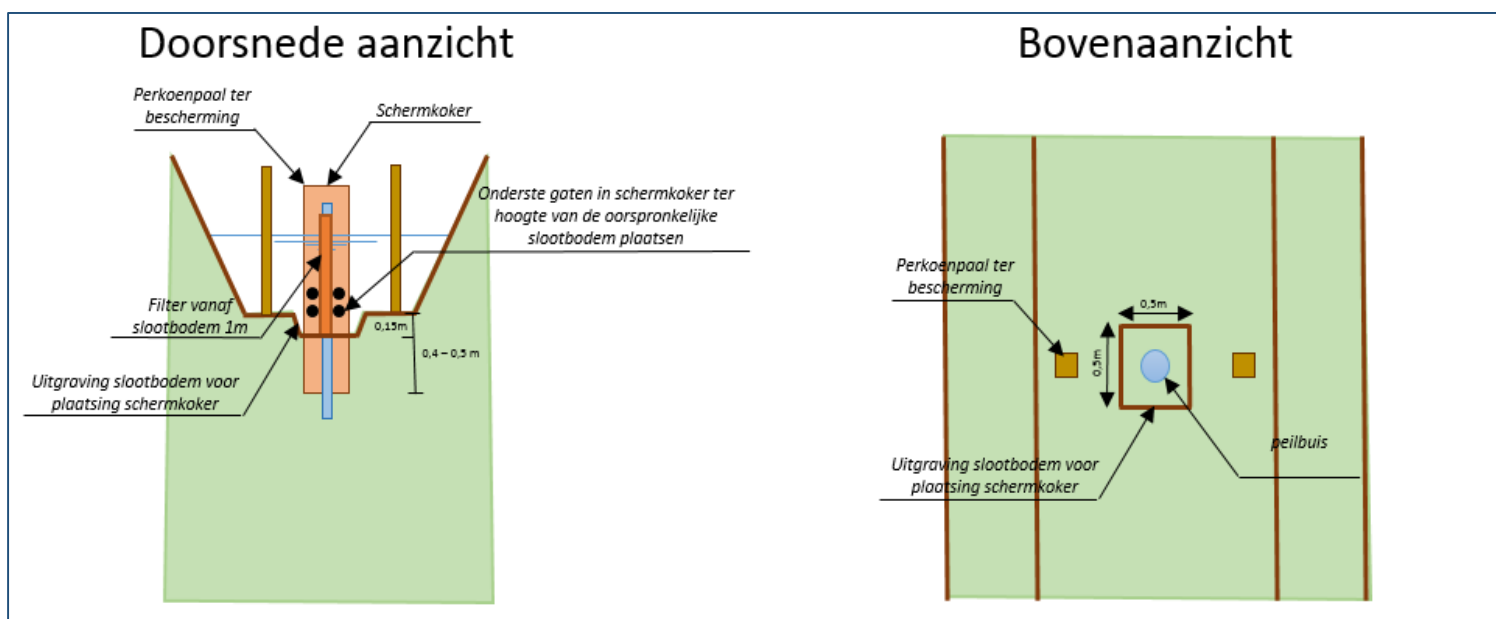
²⁸ Geperforeerde stuk buis waar het grondwater in kan stromen voor het meten van de waterstand.

Opbolling van grondwater onder de wegverharding

van de in plaats gestelde peilbuis. De extra voorbereiding betreft het gereed maken van de schermkokers. In deze schermkokers zullen gaten geboord moeten worden, zodat het water het filter kan bereiken. Vervolgens moet bij de plaatsing, zoals vermeldt in Figuur 57 een kuil van 30cm lengte en breedte en 15 cm diepte gegraven worden, zodat de onderste gaten van de schermkoker zich ten hoogte van de slootbodem bevinden. Op deze manier wordt enkel een slootwaterpeil gemeten als er ook daadwerkelijk een slootwaterpeil aanwezig is. Daarnaast zijn alle algemene maatregelen op de diepte van het filter na van toepassing. Het filter moet hier namelijk vanaf ongeveer slootbodem tot een iets minder dan een meter boven slootbodem geplaatst worden.



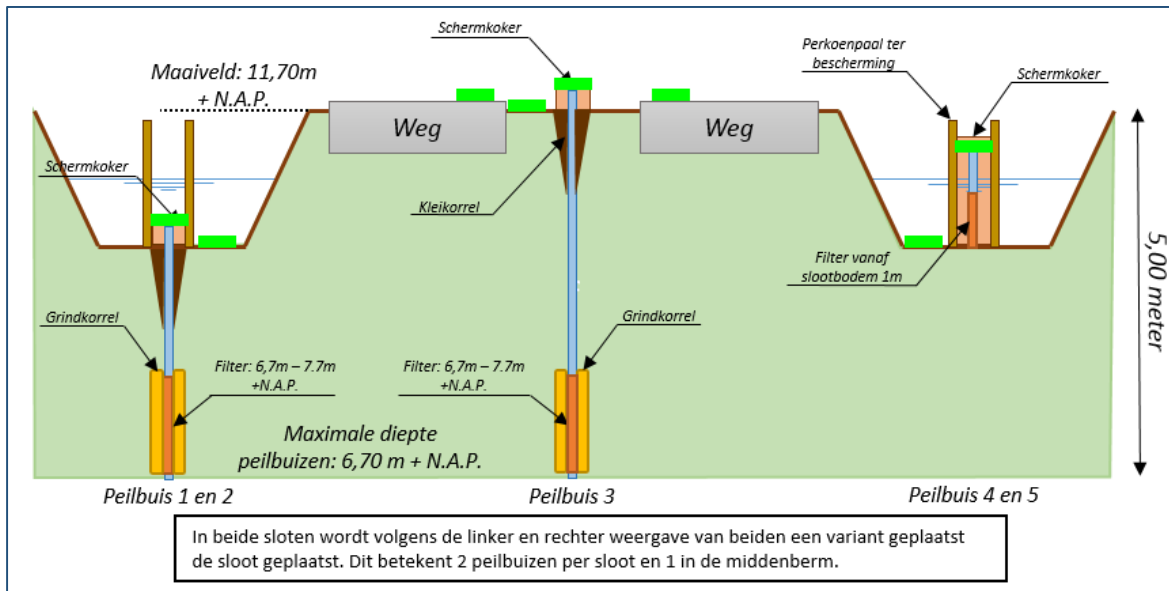
Figuur 56: Meetopstelling



Figuur 57: Meetopstelling peilbuizen voor slootwaterpeilmeting

B.4 Inmeten N.A.P. Hoogtes

Het is van uiterst belang dat een precieze meting wordt uitgevoerd voor de hoogtes van de peilbuizen, het maaiveld en de hoogte van de weg. Aan de hand van deze gegevens kunnen een aantal parameters ingevuld worden en kan het hoogteverschil in waterstand tussen de sloten en middenberm berekend worden. Kortom met behulp van deze hoogtes kan de opbolling vanuit de praktijk bepaald worden. In Figuur 58 is met de groene vlakken aangegeven voor welke locaties de hoogte ingemeten moet worden.

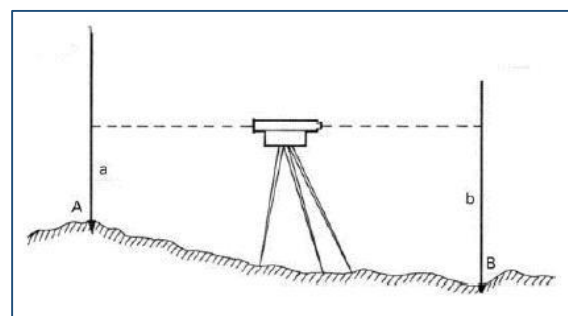


Figuur 58: Overzicht locaties voor de waterpassing

Twee mogelijkheden zijn beschikbaar om de N.A.P. hoogtes in te meten. De eerste mogelijkheid is een waterpassing vanaf een N.A.P. bout en vervolgens met de waterpassing ook de onderlinge hoogtes van de benodigde onderdelen opmeten. De tweede mogelijkheid is met een GPS-systeem een ijkpunt op de meetlocatie aanleggen en vanuit dit punt met een waterpassing de benodigde hoogtes opmeten. Een GPS maakt gebruik van de satellieten om zijn hoogte te bepalen. Dit neemt weinig tijd in beslag maar is daarentegen iets onnauwkeuriger (Bouma, Maasbommel, & Schuurman, 2012)

B.5 Waterpassing

Bij een waterpassing maakt men gebruik van een baak (een grote staande liniaal) en een waterpasinstrument die fungeert als een vizier, waarmee men op de baak de hoogte kan aflezen. Men start bij een N.A.P. bout. Dit is een punt, geregistreerd en opvraagbaar bij Rijkswaterstaat, waar de hoogte boven het Noord Amsterdamse Peil exact bepaald is. Van hieruit kan men punten gaan meten door met het vizier de hoogte op de baak af te lezen (Figuur 59). Het verschil in afgelezen hoogte tussen twee punten is dan de verlagen of verhoging die het maaiveld heeft. Afhankelijk van de afstand die afgelegd en de vaardigheid van de personen die het uitvoeren is de waterpassing een nauwkeurige meetmethode. Een grote afstand is echter wel heel tijdrovend. Zoals al vermeld zal een waterpassing in ieder geval gebruikt moeten worden bij het bepalen van benodigde hoogtes op de meetlocaties. Voor een korte afstand tot de N.A.P. bout wordt aangeraden gebruik te maken van een waterpassing.



Figuur 59: Voorbeeld waterpassingsinstrumenten

C Bijlage C

C Toetsingsmethodes op locatie

Voor de toetsing van de draagkracht moeten de eigenschappen van de ondergrond bekend zijn. Om deze eigenschappen te bepalen en controleren wordt gebruik gemaakt van proeven op locatie. Het bepalen van de draagkrachteigenschappen van de ondergrond, aardebaan en ongebonden fundering wordt volgens CROW (2010) meestal gebruik gemaakt van de volgende proeven: sondering, slagsondering, statische plaatbelastingsproef en de dynamische plaatbelastingsproef. In CROW (2014) worden nog grondradarmetingen genoemd.

CROW (2010) definieert sonderingen als: “het bepalen van de draagkracht van de grond door een staaf met kegelvormige punt met een tophoek van 60 graden°, de sondeerconus, verticaal in de grond te drukken en daarbij de mechanische weerstand van de grond te meten. Naast dat alleen de mechanische weerstand gemeten kan worden, zijn er nog verscheidende mogelijkheden om andere eigenschappen op te meten. Bijvoorbeeld de wrijvingsweerstand, geleidbaarheid van de grond of de temperatuur van de grond of het grondwater. Sonderingen kunnen op verschillende manieren worden uitgevoerd. Er kan gebruik worden gemaakt van een sondeerwagen, een vrachtwagen met de apparatuur daarin verwerkt, of men voert deze met de hand uit met een gereedschap waarin de techniek verwerkt zit. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014) & (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

Dan zijn er nog de statische en dynamische plaatbelastingsproef. Met de statische plaatbelastingsproef wordt de vervormingsmodulus/elasticiteitsmodulus bepaald. Hiermee krijgt men een beeld van de stijfheid van de verschillende lagen en materialen. De dynamische plaatbelastingsproef bepaald de oppervlaktemodulus/stijfheidsmodulus van de ondergrond. Het CROW (2010) beschrijft de dynamische plaatbelastingsproef als de snelle en praktischere variant van de statistische plaatbelastingproef. (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010)

In de lagen is verdichting een belangrijk aspect. De verdichting van de ondergrond heeft dan ook een groot effect op de uitkomsten van de proeven. Deze speelt door in de draagkracht, want een hogere dichtheid van het zand geeft ook een grotere draagkracht aan een zandbed met dit beter verdichtte zand. Daarvoor zijn die proeven weer van belang, zoals hierboven genoemd (CROW, Asfalt in weg- en waterbouw, 2010) & (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014)

Tot slot kan gebruik gemaakt worden van grondradarmetingen om de ondiepe ondergrond gemakkelijk in kaart te brengen. CROW (2014) definieert grondradarmetingen “als een niet-destructieve fysische onderzoeksmethode die met elektromagnetische golven de ondiepe ondergrond snel en met hoge resolutie in kaart kan brengen.” Aan de hand van de grondradarmetingen kunnen bijvoorbeeld diktes van constructielagen, verborgen constructieovergangen, vochtige plekken in de ondergrond, verandering in grondcondities en ligging van utiliteitsvoorzieningen achterhaalt worden. Grondradarmetingen zijn dus belangrijk om bepaalde risico's tijdens de aanleg uit te sluiten. Denk bijvoorbeeld aan het doorsteken van een kabel. (CROW, Handboek funderingsmaterialen in de wegenbouw, 2014)

D Bijlage D

D Resultaten veldmetingen middenberm

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
07-04-2013	1:00	70,5000	31,3400
07-04-2013	2:00	70,1940	31,1360
07-04-2013	3:00	70,2960	31,1360
07-04-2013	4:00	70,3980	31,2380
07-04-2013	5:00	70,7040	31,6460
07-04-2013	6:00	70,7040	31,5440
07-04-2013	7:00	70,7040	31,2380
07-04-2013	8:00	70,5000	31,1360
07-04-2013	9:00	70,6020	31,1360
07-04-2013	10:00	70,6020	31,1360
07-04-2013	11:00	70,6020	31,3400
07-04-2013	12:00	70,6020	31,1360
07-04-2013	13:00	70,9080	31,7480
07-04-2013	14:00	69,9900	30,7280
07-04-2013	15:00	70,0920	30,7280
07-04-2013	16:00	70,8060	31,2380
07-04-2013	17:00	70,5000	30,6260
07-04-2013	18:00	70,7040	30,8300
07-04-2013	19:00	70,0920	30,2180
07-04-2013	20:00	70,5000	31,4420
07-04-2013	21:00	70,0920	30,2180
07-04-2013	22:00	70,0920	30,2180
07-04-2013	23:00	70,6020	30,9320
07-04-2013	24:00	69,9900	30,1160
08-04-2013	1:00	70,2960	30,4220
08-04-2013	2:00	70,7040	30,8300
08-04-2013	3:00	70,2960	30,8300
08-04-2013	4:00	70,6020	30,6260
08-04-2013	5:00	69,9900	29,9120
08-04-2013	6:00	70,2960	30,1160
08-04-2013	7:00	70,3980	30,2180
08-04-2013	8:00	70,9080	31,0340
08-04-2013	9:00	70,5000	30,7280
08-04-2013	10:00	70,7040	31,3400
08-04-2013	11:00	71,6220	32,0540
08-04-2013	12:00	71,5200	32,1560
08-04-2013	13:00	72,3360	32,9720

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
08-04-2013	14:00	71,8260	32,7680
08-04-2013	15:00	71,8260	32,6660
08-04-2013	16:00	71,9280	32,9720
08-04-2013	17:00	72,5400	33,6860
08-04-2013	18:00	72,3360	33,5840
08-04-2013	19:00	71,6220	32,8700
08-04-2013	20:00	72,1320	32,9720
08-04-2013	21:00	72,3360	33,0740
08-04-2013	22:00	72,0300	32,5640
08-04-2013	23:00	72,1320	32,6660
08-04-2013	24:00	72,8460	33,1760
09-04-2013	1:00	72,3360	32,6660
09-04-2013	2:00	72,5400	32,8700
09-04-2013	3:00	72,7440	32,8700
09-04-2013	4:00	72,2340	32,5640
09-04-2013	5:00	72,5400	33,0740
09-04-2013	6:00	73,4580	33,7880
09-04-2013	7:00	73,6620	33,7880
09-04-2013	8:00	72,3360	32,6660
09-04-2013	9:00	72,7440	32,7680
09-04-2013	10:00	72,8460	32,7680
09-04-2013	11:00	72,8460	32,8700
09-04-2013	12:00	73,1520	33,0740
09-04-2013	13:00	72,6420	32,3600
09-04-2013	14:00	72,9480	32,3600
09-04-2013	15:00	73,5600	32,9720
09-04-2013	16:00	72,5400	32,3600
09-04-2013	17:00	72,6420	32,2580
09-04-2013	18:00	73,0500	32,7680
09-04-2013	19:00	73,2540	32,9720
09-04-2013	20:00	73,0500	33,1760
09-04-2013	21:00	73,6620	33,0740
09-04-2013	22:00	73,2540	32,7680
09-04-2013	23:00	73,5600	32,9720
09-04-2013	24:00	73,9680	33,5840
10-04-2013	1:00	73,7640	33,3800
10-04-2013	2:00	73,6620	33,3800
10-04-2013	3:00	73,9680	33,7880
10-04-2013	4:00	73,3560	33,6860
10-04-2013	5:00	72,8460	33,0740
10-04-2013	6:00	73,5600	33,9920
10-04-2013	7:00	73,2540	33,3800

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
10-04-2013	8:00	73,4580	34,2980
10-04-2013	9:00	74,2740	34,2980
10-04-2013	10:00	74,1720	34,1960
10-04-2013	11:00	74,3760	34,1960
10-04-2013	12:00	73,8660	33,8900
10-04-2013	13:00	74,3760	33,8900
10-04-2013	14:00	74,1720	33,7880
10-04-2013	15:00	74,1720	34,0940
10-04-2013	16:00	73,4580	32,7680
10-04-2013	17:00	73,6620	33,2780
10-04-2013	18:00	73,7640	32,8700
10-04-2013	19:00	73,8660	33,1760
10-04-2013	20:00	74,0700	33,1760
10-04-2013	21:00	74,7840	34,5020
10-04-2013	22:00	74,3760	33,3800
10-04-2013	23:00	74,5800	33,8900
10-04-2013	24:00	74,9880	34,5020
11-04-2013	1:00	74,3760	33,1760
11-04-2013	2:00	74,7840	33,9920
11-04-2013	3:00	74,9880	33,8900
11-04-2013	4:00	75,0900	33,9920
11-04-2013	5:00	74,7840	33,6860
11-04-2013	6:00	75,1920	34,4000
11-04-2013	7:00	75,2940	34,5020
11-04-2013	8:00	75,3960	34,7060
11-04-2013	9:00	75,6000	34,5020
11-04-2013	10:00	75,8040	34,8080
11-04-2013	11:00	75,3960	34,4000
11-04-2013	12:00	75,7020	34,5020
11-04-2013	13:00	75,6000	34,5020
11-04-2013	14:00	75,6000	34,5020
11-04-2013	15:00	76,0080	34,7060
11-04-2013	16:00	75,2940	34,1960
11-04-2013	17:00	75,4980	34,1960
11-04-2013	18:00	75,9060	35,4200
11-04-2013	19:00	75,3960	34,0940
11-04-2013	20:00	76,0080	34,8080
11-04-2013	21:00	76,1100	34,8080
11-04-2013	22:00	76,2120	34,5020
11-04-2013	23:00	75,9060	34,9100
11-04-2013	24:00	75,4980	33,9920
12-04-2013	1:00	75,9060	34,6040

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
12-04-2013	2:00	76,3140	35,5220
12-04-2013	3:00	75,9060	34,5020
12-04-2013	4:00	76,3140	35,4200
12-04-2013	5:00	76,2120	35,3180
12-04-2013	6:00	76,0080	35,3180
12-04-2013	7:00	75,9060	34,7060
12-04-2013	8:00	76,7220	35,4200
12-04-2013	9:00	76,5180	35,6240
12-04-2013	10:00	76,2120	35,4200
12-04-2013	11:00	75,8040	35,1140
12-04-2013	12:00	75,7020	35,0120
12-04-2013	13:00	75,9060	35,0120
12-04-2013	14:00	75,9060	34,6040
12-04-2013	15:00	76,2120	34,8080
12-04-2013	16:00	70,5000	35,3180
12-04-2013	17:00	70,1940	34,7060
12-04-2013	18:00	70,2960	34,1960
12-04-2013	19:00	70,3980	34,5020
12-04-2013	20:00	70,7040	34,7060
12-04-2013	21:00	70,7040	34,4000
12-04-2013	22:00	70,7040	34,9100
12-04-2013	23:00	70,5000	34,9100
12-04-2013	24:00	70,6020	34,5020
13-04-2013	1:00	70,6020	34,8080
13-04-2013	2:00	70,6020	34,8080
13-04-2013	3:00	70,6020	34,2980
13-04-2013	4:00	70,9080	35,0120
13-04-2013	5:00	69,9900	34,9100
13-04-2013	6:00	70,0920	35,5220
13-04-2013	7:00	70,8060	35,2160
13-04-2013	8:00	70,5000	34,2980
13-04-2013	9:00	70,7040	34,2980
13-04-2013	10:00	70,0920	35,2160
13-04-2013	11:00	70,5000	34,7060
13-04-2013	12:00	70,0920	34,8080
13-04-2013	13:00	70,0920	35,3180
13-04-2013	14:00	70,6020	35,6240
13-04-2013	15:00	69,9900	35,4200
13-04-2013	16:00	70,2960	35,3180
13-04-2013	17:00	70,7040	34,8080
13-04-2013	18:00	70,2960	35,9300
13-04-2013	19:00	70,6020	35,9300

Datum	Uur	Peilbuis middenberm Locatie 1	Peilbuis middenberm locatie 3
13-04-2013	20:00	69,9900	35,5220
13-04-2013	21:00	70,2960	35,4200
13-04-2013	22:00	70,3980	35,9300
13-04-2013	23:00	70,9080	35,2160
13-04-2013	24:00	70,5000	34,4000
14-04-2013	1:00	70,7040	34,2980
14-04-2013	2:00	71,6220	34,6040
14-04-2013	3:00	71,5200	35,3180
14-04-2013	4:00	72,3360	31,3400
14-04-2013	5:00	71,8260	31,1360
14-04-2013	6:00	71,8260	31,1360
14-04-2013	7:00	71,9280	31,2380

Tabel 9: Veldmetingen peilbuizen middenberm locatie 1 en 3