

Duurzame en klimaatrobuuste herinrichting watersysteem Malburgen

**Een onderzoek naar de meest effectieve manier om het watersysteem van
Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer**

Afstudeerscriptie

Hogeschool Van Hall Larenstein

Grontmij Nederland B.V.

Frederik Jansen

Juni 2015

Duurzame en klimaatrobuuste herinrichting watersysteem Malburgen

**Een onderzoek naar de meest effectieve manier om het watersysteem van
Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer**

Auteur

Frederik Jansen
frederik.jansen@wur.nl
+31 6 14371690

Opdrachtgever

Grontmij Nederland B.V.
Velperweg 26
6824 BJ Arnhem
Postbus 485
6800 AL Arnhem
T +31 88 811 54 83
F +31 26 445 92 81
www.grontmij.nl

Begeleiding

Ing. L.J. (Louis) Broersma, Grontmij

Onderwijsinstelling

Hogeschool Van Hall Larenstein
Larensteinselaan 26a
6882 CT Velp GLD

Begeleiding

Ir. A.K. Bot, Hogeschool Van Hall Larenstein

Opleiding

Land- en Watermanagement
Hydrologie (major)

Datum

3 juni 2015

Status

Definitief

Voorwoord

Voor u ligt het eindproduct van een afstudeeronderzoek dat is uitgevoerd door een student van de opleiding Land en Watermanagement. In de periode 9 februari 2015 tot 4 juni 2015 heb ik bij adviesbureau Grontmij een afstudeeronderzoek uitgevoerd naar duurzame en klimaatrobuuste herinrichting van de woonwijk Malburgen in Arnhem-Zuid.

Gedurende deze afstudeerstage heb ik veel ervaring opgedaan op het gebied van stedelijk waterbeheer en klimaatadaptatie. Daarnaast zijn mijn competenties in het modelleren van watersystemen verder ontwikkeld.

Mijn dank gaat uit naar alle collega's van Grontmij Arnhem voor de welwillendheid om mij te helpen gedurende het onderzoek. Voor interne begeleiding vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein wil ik graag dhr. Ad Bot in het bijzonder bedanken. Daarnaast gaat mijn dank uit naar dhr. Louis Broersma en dhr. Pim Dik voor de externe begeleiding vanuit Grontmij. Bij het modelleren van watersystemen ben ik vanuit Grontmij geholpen door dhr. Stefan Witteveen en dhr. Sander Hoegen, waarvoor ook mijn hartelijke dank uitgaat. Tot slot wil ik Dhr. Ronald Bos van de Gemeente Arnhem bedanken voor het inzicht wat hij mij heeft verschaft in het watersysteem van Malburgen.

Rest mij niets om u veel leesplezier te wensen.

Arnhem, 3 juni 2015

Frederik Jansen

Samenvatting

De proeftuin Kop van de Betuwe is één van de proeftuinen van het Nationaal Deltaprogramma, waarin ruimtelijke opgaven worden gekoppeld aan klimaatadaptatie. Eén van de vraagstukken waar de proeftuin Kop van de Betuwe zich op richt is droogte.

In de toekomst kunnen watertekorten optreden in de Betuwe door een veranderend klimaat en een toenemend waterverbruik. Effectief gebruik van de zoetwater voorraad van de Betuwe is wenselijk om droogtes beter het hoofd te kunnen bieden.

Malburgen is een wijk in Arnhem-Zuid die gebruik maakt van de zoetwater voorraad van de Betuwe om zo het stedelijke watersysteem door te spoelen. Momenteel verliest deze wijk in droogtes veel water aan de Nederrijn, waardoor het aangevoerde water niet effectief wordt gebruikt.

In deze rapportage wordt de volgende hoofdvraag beantwoord: Wat is, met het oog op duurzame en klimaatrobuuste herinrichting, de meest effectieve manier om het watersysteem van Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer? Als doel wordt gesteld om een maatregelenpakket op te stellen voor duurzame en klimaatrobuuste herinrichting van het watersysteem in Malburgen, zodat de externe wateraanvoer verminderd kan worden.

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden en tot het doel te kunnen komen is als methodiek gekozen om een kwetsbaarheidscan en vervolgens een adaptatieplan op te stellen. In de kwetsbaarheidscan wordt duidelijk welke factoren het gebied kwetsbaar maken. Door middel van literatuurstudie, veldwerk, advies van waterspecialisten en watermodellen is het watersysteem beschreven en de werking ervan geanalyseerd. In de adaptatieplanning zijn op basis van doelstelling, eisen en criteria de gewenste situatie van het watersysteem en de herinrichtingmaatregelen duidelijk gemaakt door een literatuurstudie en advies van waterspecialisten. Met een modelanalyse is het effect van de maatregelen op het watersysteem bepaald, waardoor een maatregelenpakket opgesteld kon worden.

De kwetsbaarheidscan maakt duidelijk dat het grond- en oppervlaktewater altijd sterk onder invloed heeft gestaan van de rivieren. Voor de aanleg van de bandijk in 1935 kon het watersysteem van Malburgen nog getypeerd worden als een uiterwaardsysteem, waarin overstromingen nog regelmatig plaatsvonden. Momenteel wordt het grond- en oppervlaktewater meer gereguleerd, waardoor de natuurlijke dynamiek is afgenomen. Desondanks heeft de rivier nog veel invloed op het grond- en oppervlaktewater in Malburgen. De zandige bodemopbouw laat, in tijden van hoge rivierstanden, veel rivier- en Veluwe kwel naar Malburgen stromen. In perioden met lage rivierstanden zijgt veel grond- en oppervlaktewater weg naar de drainerende Nederrijn. Wegzijging en verdamping maken het gebied kwetsbaar voor waterverlies. In de droge periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 blijken wegzijging en verdamping ook de grootste verliesposten van water te zijn. Dit waterverlies heeft zich onder andere geuit door een afname in grondwaterberging. De oppervlaktewaterberging is minder gevoelig voor verandering, omdat er water wordt aangevoerd naar Malburgen.

Voor adaptatieplanning wordt gestreefd naar een watersysteem dat minder afhankelijk is van externe wateraanvoer, maar het is niet wenselijk dat er knelpunten met hoge urgentie ontstaan. Het verlagen van het minimumpeil met 10 of 20 centimeter en het toepassen van een accoladeprofiel in de watergangen kunnen de gewenste situatie benaderen.

Het verlagen van het minimumpeil resulteert in de potentiële knelpunten: verdroging, oxidatie in een cultuurhistorisch element en zuurstofarm water. Een potentieel knelpunt voor het toepassen van accoladeprofielen is dat de jaarlijkse uitlaat van water toeneemt en de inlaat niet wordt verminderd. Alle maatregelen creëren daarnaast een watersysteem dat niet voldoet aan de normen voor de bui T= 10 + 10% en de bui T= 100 + 10%.

Het toepassen van uitsluitend een accoladeprofiel behoort niet tot de opties voor herinrichting, omdat de externe wateraanvoer niet wordt verminderd in dit scenario. De potentiële knelpunten van de overige maatregelen krijgen geen hoge urgentie, omdat ze heel tijdelijk optreden, geen grote gevolgen hebben of relatief gemakkelijk zijn op te lossen.

Met het oog op duurzame en klimaatrobuuste herinrichting is de meest effectieve manier, om het watersysteem van Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer, het toepassen van een accoladeprofiel in de watergangen in combinatie met 20 centimeter verlaging van het minimumpeil.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Verklarende woordenlijst

1	Inleiding	12
1.1	Aanleiding.....	12
1.2	Probleemstelling.....	13
1.3	Doel.....	13
1.4	Afbakening.....	13
1.5	Doelgroep	13
1.6	Leeswijzer	14
1.7	Beperkingen.....	14
2	Methodiek	15
2.1	Kwetsbaarheidscan.....	15
2.2	Adaptatieplanning.....	16
3	Gebiedskarakteristieken Malburgen	17
3.1	Locatie van het projectgebied	17
3.2	Landgebruik.....	17
3.3	Hoogte maaiveld	18
3.4	Ontwikkeling watersysteem Malburgen over de tijd.....	19
3.5	Geohydrologie en hydrologie.....	23
4	Analyse werking van watersysteem Malburgen gedurende een droge periode	32
4.1	Werking watersysteem volgens spreadsheetmodel	32
4.2	Werking watersysteem volgens Sobek model	34
4.3	Conclusies betreffende werking watersysteem Malburgen gedurende droge periode	37
5	Gewenste situatie watersysteem Malburgen	39
5.1	Doelstellingen	39
5.2	Eisen.....	39
5.3	Criteria	40

6	Maatregelen voor een duurzamer en klimaatrobuuster watersysteem Malburgen	41
6.1	<i>Geëlimineerde maatregelen</i>	41
6.2	<i>Geselecteerde maatregelen.....</i>	41
6.3	<i>Kansen voor verlaging minimumpeil</i>	43
6.4	<i>Kansen voor accoladeprofiel.....</i>	44
6.5	<i>Kansen voor verlaging minimumpeil en toepassing accoladeprofiel.....</i>	45
6.6	<i>Potentiële knelpunten als gevolg van de maatregelen.....</i>	46
7	Effect van de maatregelen op het watersysteem gedurende een droog en een nat scenario	47
7.1	<i>In- en uitlaat van water gedurende een droge periode</i>	47
7.2	<i>Toetsing van het watersysteem aan bui $T = 10 + 10\%$.....</i>	48
7.3	<i>Toetsing van het watersysteem aan bui $T = 100 + 10\%$.....</i>	50
7.4	<i>Aanbevolen maatregelen</i>	53
8	Conclusies en aanbevelingen.....	55
8.1	<i>Conclusies</i>	55
8.2	<i>Aanbevelingen</i>	56
	Reflectie	58
	<i>Inhoud.....</i>	58
	<i>Methodiek</i>	58
	<i>Persoonlijk functioneren.....</i>	58
	Bijlage 1: Stijghoogtes en rivierstanden over de periode 1990 - 2006	59
	Bijlage 2: Methodiek stijghoogte analyse.....	60
	Bijlage 3: Achtergrond, doel en methodiek spreadsheetmodel Malburgen.....	61
	Bijlage 4: Achtergrond, doel en methodiek Sobek model Malburgen.....	66
	Bijlage 5: Resultaten spreadsheetmodel en stijghoogtes uit DINOLOket.....	71
	Bijlage 6: Maximum peilstijging gedurende bui $T = 10 + 10\%$	72
	Bronvermelding	73

Verklarende woordenlijst

A-watergang: kan worden gedefinieerd als een hoofdwatgang die beheerd wordt door het waterschap.

Bandijk: dijk van het winterbed (Encyclo, z.d.).

Beeldkwaliteit: is een instrument om de kwaliteit van het aanzicht van bebouwd gebied te beoordelen (Encyclo, z.d.).

Besluit Kwaliteitseisen en Monitoring Water: stelt eisen aan de kwaliteit van oppervlaktewater- en grondwaterlichamen in Nederland (Helpdesk water, z.d.).

Binnendijks: de droge landzijde, wat wordt beschermd door winterdijken (Encyclo, z.d.).

Buisdrainage: grond ontwateren door middel van een buis met gaatjes (Encyclo, z.d.).

Buitendijks: het gebied tussen de winterdijken, dus de rivierbedding en de uiterwaarden (Encyclo, z.d.).

Correlatie: instrument om te bepalen in hoeverre variabelen met elkaar samenhangen. Correlatie kan een waarde aannemen tussen -1 en +1. Waardes dicht bij nul geven aan dat er weinig samenhang is tussen de variabelen, terwijl waardes rond -1 en +1 veel samenhang aangeven (Encyclo, z.d.).

Cultuurhistorie: overblijfselen van alles wat door mensen is gemaakt en niet op natuurlijke wijze is ontstaan (Encyclo, z.d.).

C-waarde: weerstand van de slecht doorlatende lagen, uitgedrukt in dagen (B. Bot, 2011).

C-watergang: is een watgang die door de aanliggende eigenaar of eigenaren wordt onderhouden. Het waterschap voert hier geen jaarlijkse controle op uit (Waterschap Vallei en Veluwe, z.d.).

DINOloket: portaal met data en informatie van de Nederlandse ondergrond (DINOloket, z.d.).

Doorlaatfactor: een maat voor het vermogen van de grond om water door te laten (Encyclo, z.d.).

Draineren: water ondergronds afvoeren naar een waterlichaam (Encyclo, z.d.).

Drooglegging: hoogteverschil tussen het waterpeil in het oppervlaktewaterlichaam en het grondoppervlak (Encyclo, z.d.).

Ecologische hoofdstructuur: term gebruikt door de overheid om een samenhangend stelsel aan te geven van kerngebieden, natuurontwikkelingsgebieden en verbindingzones dat prioriteit krijgt in het natuur- en landschapsbeleid (Encyclo, z.d.).

Externe wateraanvoer: aanvoer van water wat van buiten het projectgebied komt. In deze rapportage ook wel gedefinieerd als gebiedsvreemd water.

Erosie: transporteren van bodemmateriaal door wind of water (Encyclo, z.d.).

Formatie: een aardlaag of een groep van aardlagen die in hetzelfde tijdperk of onder gelijk omstandigheden zijn ontstaan (Encyclo, z.d.).

Freatisch grondwater: de waterspiegel in de bovenste bodemlagen (Encyclo, z.d.).

Gebiedseigen water: water wat van origine in het projectgebied thuishoort en niet door mensen wordt aangevoerd.

Gemiddelde hoogste grondwaterstand: is het gemiddelde van de 3 hoogst waargenomen standen per hydrologisch jaar, gedurende 8 hydrologische jaren (B. Bot, 2011).

Gemiddelde laagste grondwaterstand: is het gemiddelde van de 3 laagst waargenomen standen per hydrologisch jaar, gedurende 8 hydrologische jaren (B. Bot, 2011).

Geohydrologie: wetenschap die grondwater onderzoekt (Encyclo, z.d.).

Geohydrologische basis: ondoorlatende onderbegrenzing van één of meer geohydrologische systemen (Encyclo, z.d.).

Geologie: wetenschap die de opbouw van de aarde onder het aardoppervlak bestudeert (Encyclo, z.d.).

Gescheiden rioolstelsel: afvalwater en regenwater worden via afzonderlijke leidingenstelsels ingezameld en afgevoerd (Encyclo, z.d.).

Holoceen: meest recente geologische tijdvak, welke 10.000 jaar geleden is begonnen en nog steeds voortduurt (Encyclo, z.d.).

Hydrologie: wetenschap die het water in de atmosfeer en op de aarde bestudeert (Encyclo, z.d.).

Hydrologisch jaar: loopt van 1 april tot en met 31 maart (Wageningen Universiteit, z.d.).

Hydromorfe verschijnselen: roestvlekken en grijze reductievlekken (T. Jongmans en G. Peek, z.d.).

Kalibreren: ijken van het watermodel aan meetgegevens totdat de range van onzekerheid klein genoeg is bevonden (Encyclo, z.d.).

kD-waarde: is de doorlaatfactor maal de dikte van het watervoerende pakket.

Klimaatadaptatie: aanpassen aan een veranderd klimaat, zodat een gebied minder kwetsbaar wordt.

Kolk: tot 12 meter diepe put, als overblijfsel van een dijkdoorbraak (Encyclo, z.d.).

Kom: laagte tussen stroomruggen (Encyclo, z.d.).

Kronkelwaard: een binnen de riviermeanders gelegen stroomrug met een bultig reliëf (Encyclo, z.d.).

Kwel: grondwater dat uitteedt aan het maaiveld (Encyclo, z.d.).

Meanderende rivier: een rivier die in grote kronkels voort stroomt en die langzaam en geleidelijk van plaats verandert door erosie aan de buitenbochten en sedimentatie in de binnenbochten (Encyclo, z.d.).

NAP: afkorting voor het Normaal Amsterdams Peil. Een NAP hoogte van 0 meter is ongeveer gelijk aan zeeniveau (Encyclo, z.d.).

Natte omtrek: in een dwarsdoorsnede van de watergang is het de lengte van de grens tussen het water en de wanden en bodem van de watergang (Encyclo, z.d.).

- Nat oppervlak:** het oppervlak water in een dwarsdoorsnede van de watergang.
- Natura2000:** term van de Europese Unie voor het groot Europees netwerk van beschermde natuurgebieden met als doel: behoud en herstel van de biodiversiteit in de Europese Unie (Encyclo, z.d.).
- Ooivaaggrond:** kleigrond waarin hydromorfe verschijnselen dieper dan 30 centimeter beginnen (T. Jongmans en G. Peek, z.d.).
- Ontwateringdiepte:** is een maat voor het hoogteverschil tussen het maaiveld en de freatische grondwaterstand (Encyclo, z.d.).
- Overslaggrond:** tijdens een dijkdoorbraak, rondom een kolk, uitgewaaierte grond (Encyclo, z.d.).
- Oxidatie:** verteren van organisch materiaal als zuurstof doordringt in de bodemlaag (Encyclo, z.d.).
- Sedimentatie:** afzetten van grond wat door wind of water is getransporteerd (Encyclo, z.d.).
- Stijghoogte:** is de hoogte ten opzichte van een referentievlak, tot waar het grondwater opstijgt in een buis die zowel in open verbinding staat met de atmosfeer als met het grondwater in een watervoerend pakket (Encyclo, z.d.).
- Stowa:** kenniscentrum van regionale waterbeheerders in Nederland (Stowa, z.d.).
- Strang:** dode rivierarm (Encyclo, z.d.).
- Stroomrug:** relatief hooggelegen strook in een riviervlakte, bestaande uit een opgevulde verlaten rivierloop en de daarbij behorende oeverwallen (Encyclo, z.d.).
- Uiterwaard:** buitendijks gebied tussen de zomerkade en de bandijk (Encyclo, z.d.).
- Verifiëren:** het controleren van de berekende resultaten met de meetgegevens.
- Vierde Nota Waterhuishouding:** legt de belangrijkste beleidsdoelstellingen voor waterbeheer vast voor met name de periode 1998 – 2006 (Waddenzee, z.d.).
- Vlechtende rivier:** rivier met wisselende bedding als gevolg van opvulling door sedimenten (Encyclo, z.d.).
- Vorstbestrijding:** beregenen van bomen of gewassen om ze te beschermen tegen vorst.
- Watervoerend pakket:** bodemlaag die water doorvoert en die aan boven- en onderzijde begrenst wordt door een ondoorlatende laag of door een vrije waterspiegel. (Encyclo, z.d.) Het watervoerende pakket dat het dichtst tegen het maaiveld ligt, wordt het eerste watervoerende pakket genoemd.
- Wegzijging:** stroming van grondwater in neerwaartse richting (Encyclo, z.d.).
- Wetering:** brede, meestal gegraven afwateringssloot in een kom (Encyclo, z.d.).
- Zavel:** mengsel van zand en klei (Encyclo, z.d.).
- Zetting:** inzakken van de bodem door wateronttrekking of belasting van de grond (Encyclo, z.d.).

1 Inleiding

De inleiding van deze rapportage bevat de aanleiding, de probleemstelling, het doel, de afbakening, de doelgroep, de leeswijzer en de beperkingen van dit onderzoek.

1.1 Aanleiding

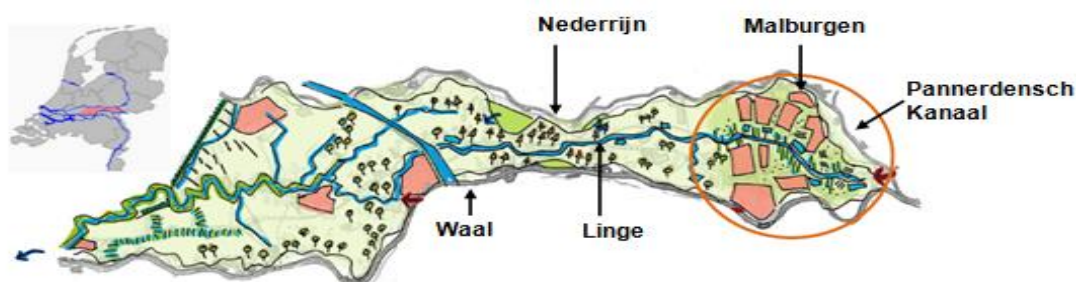
Het klimaat verandert, daar twijfelt niemand over. In Nederland leidt de klimaatverandering onder meer tot een toenemende kans op watertekorten als gevolg van droge periodes (C. Van Bladeren, z.d.). Daarnaast neemt de vraag naar zoetwater voor landbouw, natuur, drinkwater en industrie toe.

Door de klimaatverandering en de toenemende watervraag wordt zoetwater in Nederland schaarser (Deltacommissaris, z.d.). Het is daarom wenselijk om intense droogtes, zoals de zomer van 2003, beter op te vangen om maatschappelijke schade te voorkomen of te beperken.

Het Nationaal Deltaprogramma van de overheid is gericht op klimaatadaptatie, waaronder ook adaptatie aan droogte (Rijksoverheid, z.d.). Het deelprogramma Nieuwbouw en Herstructurering van het Nationaal Deltaprogramma is door middel van interactief ontwerpend onderzoek bezig om lokaal ruimtelijke opgaven te verbinden aan de uitgangspunten van het Deltaprogramma, waarvan voldoende zoetwater er één is (Molster Stedenbouw, 2013).

In de vorm van proeftuinen wordt dit interactief ontwerpend onderzoek uitgevoerd. De proeftuin Kop van de Betuwe is één van de proeftuinen die zich richt op klimaatbestendige (her)inrichting (Molster Stedenbouw, 2013).

De proeftuin Kop van de Betuwe is gelegen in het oostelijk deel van de Betuwe. In figuur 1 is de Betuwe weergegeven. In deze afbeelding valt de Kop van de Betuwe binnen de oranje cirkel. De rode markering in het kaartje van Nederland geeft de locatie van de Betuwe aan.



figuur 1: Betuwe (T.Drost, 2014)

De aanvoer van zoetwater in de Betuwe vindt grotendeels plaats via de Linge, welke water aangevoerd krijgt vanuit het Pannerdensch kanaal. In perioden met laagwater, krijgt de Linge minder water aangevoerd, wat direct gevolgen heeft voor onder andere de agrarische sector en de stedelijke watersystemen in de Betuwe (L.J. Broersma, 2013). De agrarische sector in de Betuwe heeft een grote behoefte aan water uit de Linge, voornamelijk als vorstbestrijding in de fruitteelt gedurende het voorjaar (H.Th. L. Massop, 2014). De stedelijke watersystemen gebruiken water uit de Linge voornamelijk voor doorspoeling (L.J. Broersma, 2013). Er wordt verwacht dat klimaatverandering en toenemend watergebruik de zoetwatervoorraad in de Betuwe verder onder druk zetten (H.Th. L. Massop, 2014), waardoor het waterschap mogelijk niet meer kan voorzien in de waterbehoefte van de agrariërs. Het is daarom wenselijk dat gebruikers van het Linge water effectief met dit water omspringen om zo de gebruikersdruk op de voorraad zoetwater in de Betuwe af te laten nemen.

De woonwijk Malburgen in Arnhem-Zuid is een gebruiker van het Linge water (Gemeente Arnhem, z.d.). De locatie van deze woonwijk is weergegeven in figuur 1.

Door de bodembouw en de ligging naast de Nederrijn, wordt Malburgen gezien als een oorzaak voor het verlies van water dat uit de Linge is aangevoerd (L.J. Broersma en M.C.J. Kramer, 2014). In het kader van de proeftuin Kop van de Betuwe en een afstudeeropdracht, is daarom een onderzoek opgezet naar de mogelijkheden om watersysteem Malburgen duurzaam en klimaatrobuust herin te richten, waardoor de externe aanvoer van water naar deze woonwijk kan worden verminderd.

1.2 Probleemstelling

Het watersysteem van Malburgen wordt, via andere wijken in Arnhem-Zuid, voorzien van water uit de Linge. De aanvoer is belangrijk om een vast streefpeil te hanteren en de watercirculatie in het stedelijk watersysteem op gang te houden. Daarnaast worden stank en slechte beeldkwaliteit door droogvallende watergangen voorkomen (Waterschap Rivierenland, 2002).

Echter, de zandige bodemopbouw van de wijk Malburgen in combinatie met de drainerende werking van de Nederrijn laten aangevoerd water verdwijnen uit de Betuwe (H. Th. L. Massop, 2014). Dit draagt bij aan het schaarser worden van zoetwater in de Betuwe gedurende droge perioden (L.J. Broersma en M.C.J. Kramer, 2014).

De hoofdvraag, die in deze rapportage wordt beantwoord, luidt:

Wat is, met het oog op duurzame en klimaatrobuuste herinrichting, de meest effectieve manier om het watersysteem van Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer?

Om tot een antwoord te komen op de hoofdvraag, zijn deelvragen opgesteld door gebruik te maken van de Handreiking voor een Stresstest Klimaatbestendigheid (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

De eerste twee deelvragen zijn onderdeel van de kwetsbaarheidscan, waarin wordt onderzocht welke factoren het projectgebied kwetsbaar maken voor verlies van water gedurende een droge periode. De laatste vier vragen zijn onderdeel van adaptatieplanning, wat duidelijk moet maken wat de kansen zijn voor adaptatie aan droogtes (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

Kwetsbaarheidscan

1. *Wat zijn de gebiedskarakteristieken van projectgebied Malburgen?*
2. *Hoe werkt het huidige watersysteem van Malburgen gedurende een droge periode?*

Adaptatieplanning

3. *Wat zijn de doelstellingen, eisen en criteria voor de gewenste situatie van watersysteem Malburgen?*
4. *Welke maatregelen kunnen het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk maken van externe wateraanvoer?*
5. *Wat is het effect van de maatregelen op het watersysteem gedurende een uiterst droog en een uiterst nat scenario?*
6. *Welk maatregelenpakket wordt op basis van effectiviteit aanbevolen om de gewenste situatie zo goed mogelijk te kunnen benaderen?*

1.3 Doel

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van een maatregelenpakket voor duurzame en klimaatrobuuste herinrichting van het watersysteem in de wijk Malburgen, zodat de externe wateraanvoer verminderd kan worden.

1.4 Afbakening

Dit onderzoek levert scenario's voor duurzame en klimaatrobuuste herinrichting van het watersysteem in de wijk Malburgen. Er worden watersysteemtechnische oplossingen aangeleverd om de externe aanvoer van water naar de wijk te verminderen. Er is niet ingegaan op juridische en financiële eisen en gevolgen van de maatregelen. Bovendien is in dit rapport niet een definitief technisch ontwerp van de maatregelen opgesteld.

1.5 Doelgroep

Dit onderzoek is opgesteld voor (geo)hydrologen van Grontmij. Het projectgebied is onderdeel van het oppervlaktewaterbeheersgebied van het waterschap Rivierenland en daarom is deze overheidsinstantie een belangrijke doelgroep. Daarnaast is dit onderzoek opgesteld voor docenten en studenten van Hogeschool Van Hall Larenstein.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de gevolgde methodiek gedurende het onderzoek. De locatie, het landgebruik, de maaiveldhoogte, de historische ontwikkeling van het watersysteem en de huidige (geo)hydrologie worden beschreven in hoofdstuk 3. Het vierde hoofdstuk betreft een modelanalyse van de werking van het watersysteem gedurende een droge periode. De resultaten worden daarbij geanalyseerd op betrouwbaarheid. In het vijfde hoofdstuk wordt een gewenste situatie geschetst door middel van doelstellingen, eisen en criteria. In het zesde hoofdstuk worden vervolgens maatregelen voor herinrichting geopperd en wordt onderzocht hoe kansrijk de maatregelen zijn en wat de potentiële knelpunten zijn. Het zevende hoofdstuk gaat in op de effecten van de maatregelen op water in- en uitlaat gedurende droge perioden. Daarnaast worden de maatregelen getoetst aan de normen voor een nat scenario. Vervolgens wordt een maatregelenpakket aanbevolen op basis van de effectiviteit, waarmee de maatregelen de externe wateraanvoer verminderen. Uiteindelijk worden in het achtste hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen weergegeven.

1.7 Beperkingen

Gebrek aan meetgegevens heeft verhinderd om gekalibreerde watermodellen van het projectgebied op te kunnen stellen. Deze rapportage geeft daarom een gevoeligheidsanalyse weer voor herinrichting van het watersysteem. Dit houdt in dat de exacte hoeveelheden die het Sobek model berekent, waarschijnlijk niet overeenkomen met de werkelijke hoeveelheden. Echter het geeft wel een idee over de effectiviteit, waarmee de maatregelen de huidige externe wateraanvoer verminderen. Op basis daarvan is een maatregelenpakket aanbevolen.

2 Methodiek

De methodiek van dit onderzoek is in hoofdlijnen gebaseerd op de Handreiking voor een Stresstest Klimaatbestendigheid, dat onderdeel is van het Kennisportaal Ruimtelijke Adaptatie (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

De handreiking faciliteert bij het opzetten en uitvoeren van onderzoek naar de klimaatbestendigheid van bebouwd gebied en naar mogelijke maatregelen om de leefomgeving aan te passen aan het veranderende klimaat. Dit alles conform de generieke uitgangspunten zoals die zijn afgesproken door de partners van het Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

2.1 Kwetsbaarheidscan

Het onderzoek naar herinrichting van het watersysteem in de woonwijk Malburgen is gestart met het opstellen van een kwetsbaarheidscan. Deze scan geeft een beschrijving van het watersysteem en maakt duidelijk hoe het watersysteem werkt om zo inzichtelijk te krijgen welke factoren het watersysteem kwetsbaar maken voor waterverlies gedurende een droge periode (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

De kwetsbaarheidscan is uitgevoerd door eerst de Gemeente Arnhem en het waterschap Rivierenland op de hoogte te stellen van het initiatief om de wijk Malburgen minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer. Deze partijen zijn ook uitgenodigd om betrokken te zijn bij dit initiatief. Vervolgens is de kwetsbaarheidscan verder uitgewerkt door het onderzoeken van de gebiedskarakteristieken van Malburgen en de werking van het watersysteem te analyseren aan de hand van modellen.

2.1.1 *Gebiedskarakteristieken van Malburgen*

Door middel van literatuurstudie, veldwerk en advies van specialisten binnen Grontmij en de gemeente Arnhem zijn de locatie, het landgebruik, de maaiveldhoogte, de historische ontwikkeling van het watersysteem en de (geo)hydrologie van het projectgebied beschreven.

Vervolgens kon aan de hand van deze informatie een antwoord worden gegeven op de deelvraag: wat zijn de gebiedskarakteristieken van het projectgebied Malburgen?

2.1.2 *Analyse van de werking van het watersysteem gedurende een droge periode*

De kwetsbaarheidscan is verder uitgewerkt door de werking van het watersysteem Malburgen te analyseren.

Deze analyse is uitgevoerd met behulp van modellen die zijn opgebouwd aan de hand van literatuurstudie, veldwerk en advies van waterspecialisten. De watermodellen maken het mogelijk om te rekenen aan het watersysteem.

Door gebrek aan meetgegevens was het niet mogelijk om deze analyse met een gekalibreerd model uit te kunnen voeren. De urgentie van het project laat het echter niet toe om te wachten totdat al de benodigde gegevens gemeten zijn. Er is daarom besloten om de analyse uit te voeren met een spreadsheetmodel en een Sobek model. Voor achtergronden, doelen en methodiek van beide modellen, zie bijlage 3 en bijlage 4.

Beide modellen kunnen rekenen aan grond- en oppervlaktewater. Het spreadsheetmodel rekent ten opzichte van het Sobek model nauwkeuriger aan het grondwater, terwijl het Sobek model nauwkeuriger rekent aan het oppervlaktewater.

Vanwege de relatief goede grondwatercomponent in het spreadsheetmodel is besloten om dit model te verifiëren met stijghoogtes die gemeten zijn door DINOluket in het eerste watervoevende pakket van Malburgen.

Door parameters in het model voortdurend te veranderen, is een watersysteem gemodelleerd dat overeenkomt met het werkelijke watersysteem. Op deze manier is een definitief spreadsheetmodel opgesteld, waarmee gerekend is in dit onderzoek.

Aangezien er vrijwel geen meetgegevens beschikbaar zijn van het oppervlaktewater, is besloten om het Sobek model te verifiëren met het spreadsheetmodel. De verificatie is uitgevoerd door de grondwaterstanden en de in- en uitlaat van water, die beide modellen berekenen, met elkaar te vergelijken.

De parameters van het Sobek model zijn voortdurend gewijzigd om een watersysteem te modelleren die overeenkomt met het definitieve spreadsheetmodel. Op deze manier is een definitief Sobek model opgesteld, waarmee gerekend is in dit onderzoek.

Na de verificatie zijn het definitieve spreadsheet- en Sobek model voor eenzelfde droge periode doorgerekend om per model een waterbalans van het gebied op te stellen. Bij het opstellen van de waterbalansen is als randvoorwaarde aangenomen dat het waterpeil nergens onder het zomer streefpeil mag zakken.

Uit de waterbalansen is gebleken welke in- en uitposten belangrijk zijn gedurende een droge periode. Op basis van deze informatie zijn uitspraken gedaan over de werking van het watersysteem en is geconcludeerd wat het projectgebied kwetsbaar maakt voor het verlies van water gedurende een droge periode. Op deze manier is een antwoord gekregen op de vraag: Hoe werkt het huidige watersysteem van Malburgen gedurende een droge periode?

2.2 Adaptatieplanning

Naar aanleiding van de uitkomsten van de kwetsbaarheidscan, is een adaptatieplan opgesteld om het gebied minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer (F. van de Ven, J. Buma, T. Vos, 2014).

Dit adaptatieplan is opgesteld door doelstellingen, eisen en criteria op te sommen voor de gewenste situatie van het watersysteem. Vervolgens zijn potentiële maatregelen aangedragen en zijn de kansen en de knelpunten van deze maatregelen bepaald. Uiteindelijk is een maatregelenpakket aanbevolen.

2.2.1 Doelstellingen, eisen en criteria

Voor het adaptatieplan is door middel van literatuurstudie de volgende deelvraag beantwoord: Wat zijn de doelstellingen, eisen en criteria voor de gewenste situatie van watersysteem Malburgen?

2.2.2 Potentiële maatregelen

Advies van waterspecialisten, een literatuurstudie en de kwetsbaarheidscan hebben het mogelijk gemaakt om een antwoord te kunnen geven op de deelvraag: Welke maatregelen kunnen het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk maken van externe wateraanvoer?

2.2.3 Effect van de maatregelen in uiterst droog en uiterst nat scenario

Uiteindelijk is met het definitieve Sobek model bepaald wat het effect van de maatregelen is op de in- en uitlaat van water gedurende een droog scenario. Bovendien zijn de maatregelen getoetst aan de normen voor een nat scenario.

Met het Sobek model is dus een antwoord gekregen op de deelvraag: Wat is het effect van de maatregelen op het watersysteem gedurende een uiterst droog en een uiterst nat scenario?

2.2.4 Aanbevolen maatregelenpakket

Er is voor gekozen om niet exact de werkelijkheid te benaderen met het Sobek model, omdat het model niet gekalibreerd is. In plaats daarvan is een watersysteem benaderd wat efficiënt omspringt met water. In het Sobek model is door middel van twee fictieve gemalen en fictieve stuwinstellingen een watersysteem geconstrueerd dat efficiënt water laat aanvoeren en afvoeren. Dit betekent dat er niet moet worden verwacht dat de hoeveelheden die de modellen berekenen exact overeenkomen met de werkelijke hoeveelheden. Wel geeft deze rapportage een indicatie van de effectiviteit, waarmee de maatregelen de huidige externe wateraanvoer verminderen.

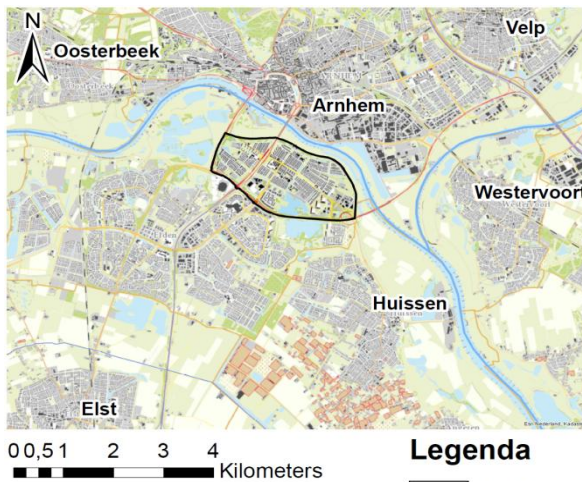
Op deze manier is antwoord verkregen op de deelvraag: Welk maatregelen pakket wordt op basis van effectiviteit aanbevolen om de gewenste situatie zo goed mogelijk te kunnen benaderen.

3 Gebiedskarakteristieken Malburgen

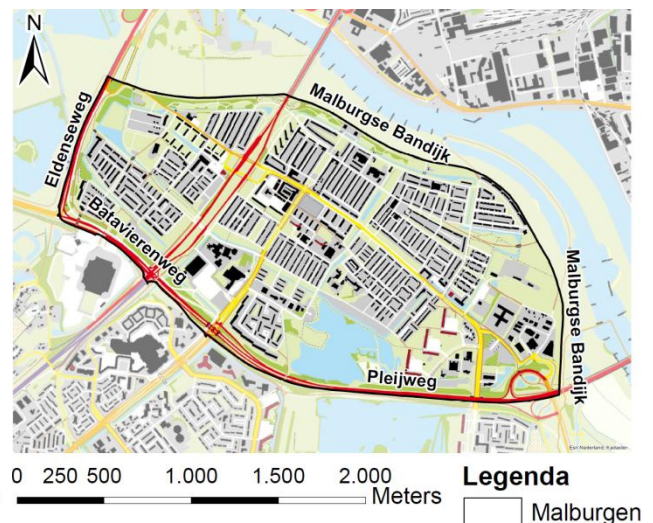
In dit hoofdstuk komen de gebiedskarakteristieken van het projectgebied naar voren. In de eerste drie paragrafen worden de locatie, het landgebruik en de maaiveldhoogte van het projectgebied behandeld. Vervolgens zal in de daaropvolgende twee paragrafen een beschrijving worden gegeven van het watersysteem. Zowel de historische ontwikkeling van het watersysteem als de actuele (geo)hydrologie komt aan orde.

3.1 Locatie van het projectgebied

Het projectgebied Malburgen is een wijk in Arnhem-Zuid en is gelegen in het noordelijk deel van de Kop van de Betuwe, langs de zuidoever van de rivier de Nederrijn, zie figuur 1 en figuur 2. De wijk is in het noorden en oosten omsloten door de Malburgse Bandijk, in het westen door de Eldense weg en in het zuiden door de Batavierenweg en de Pleijweg, zie figuur 3. De topografische kaart van figuur 3 wordt in deze rapportage bij verschillende figuren als achtergrondkaart gebruikt.



figuur 2: Projectgebied Malburgen
(Kadaster en RUG Geodienst, 2014)



figuur 3: Projectgebied Malburgen
(Kadaster en RUG Geodienst, 2014)

3.2 Landgebruik

Het landgebruik van Malburgen kan onderverdeeld worden in de volgende functies: bebouwing, openbaar groen, recreatie, wegen, open water, braakliggend terrein en landbouw.

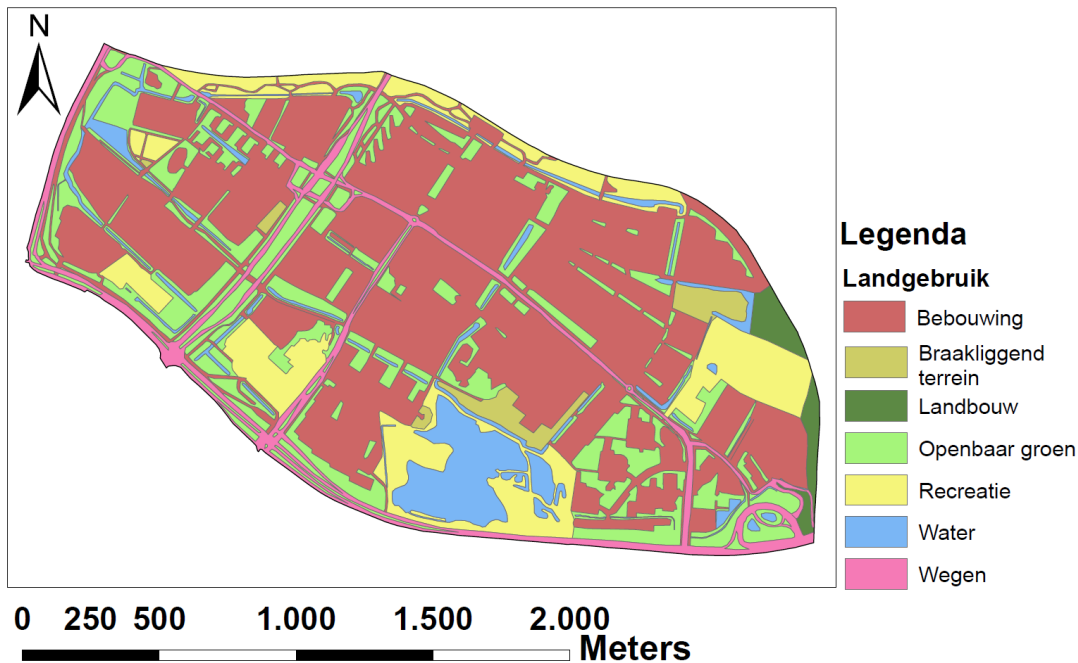
In tabel 1 zijn de oppervlaktes per functie weergegeven. De tabel is geconstrueerd door in ArcGIS de oppervlaktes per functie te berekenen.

De bebouwing in het projectgebied bestaat voornamelijk uit woningen en straten, maar daarnaast ook uit een gevangenis, scholen en een bedrijventerrein. Het openbaar groen wordt gevormd door plantsoenen en bermen. Onder recreatie vallen parken, sportcomplexen, sportvelden en een evenementenhal. De Eldense weg, Batavierenweg en Pleijweg vormen de belangrijkste verkeersaders om Malburgen heen. Het openwater bestaat uit watergangen en de waterplas Eimersweide. Tot slot vallen onder braakliggend terrein voornamelijk bouwterreinen en is landbouw aanwezig in de vorm van weides.

Landgebruik	Oppervlak (ha)	Deel van totaal oppervlak (%)
Bebouwing	185	51
Openbaar groen	70	19
Recreatie	44	12
Wegen	25	7
Open water	24	7
Braakliggend terrein	7	2
Landbouw	5	1

tabel 1: Landgebruik Malburgen

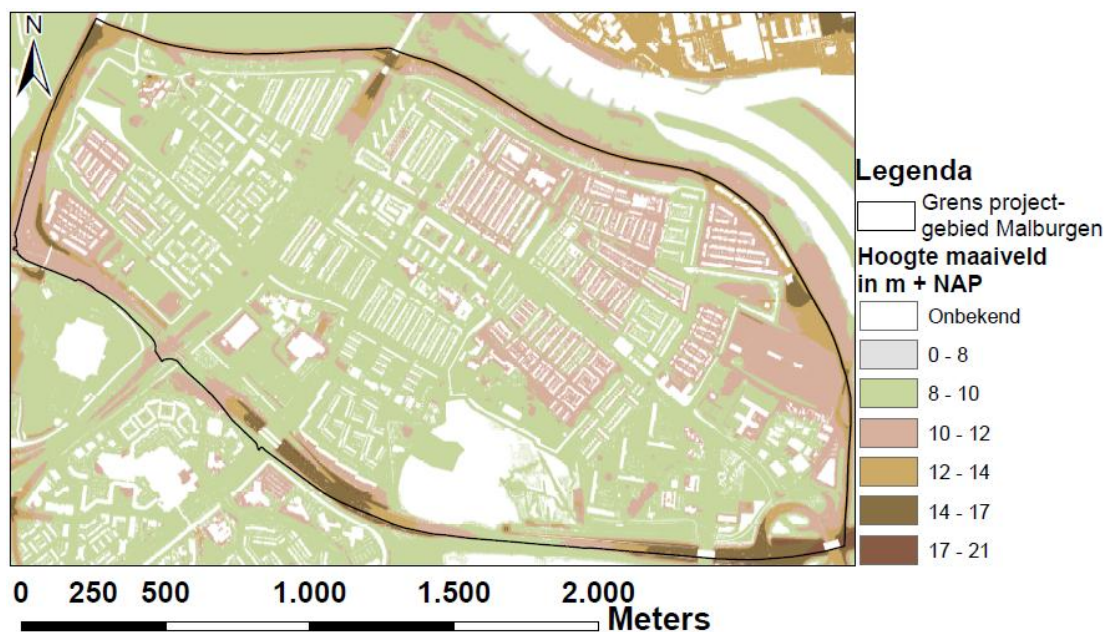
De kaart van figuur 4 geeft de verschillende functies ruimtelijk weer. De kaart is in ArcGIS geconstrueerd aan de hand van een online bodem- en topografische kaartkaart van ArcGIS. Wat betreft de ruimtelijke weergave van de verschillende functies, valt vooral de grote waterplas Eimersweide in het zuiden van het projectgebied op.



figuur 4: Landgebruik Malburgen (CBS, Nationaal Georegister en PDOK, 2014)

3.3 Hoogte maaiveld

In figuur 5 is de hoogte van het maaiveld in Malburgen weergegeven. Het grootste deel van de wijk heeft een hoogte die varieert tussen 9 en 12 meter + NAP. De Malburgse Bandijk, Eldense weg, Batavierenweg en de Pleijweg wijken van deze waarde af, met een hoogte die varieert tussen 12 en maximaal 21 meter + NAP.



figuur 5: Hoogte maaiveld (Esri Nederland, PDOK, Provincies, Rijkswaterstaat en Waterschapshuis, 2014)

3.4 Ontwikkeling watersysteem Malburgen over de tijd

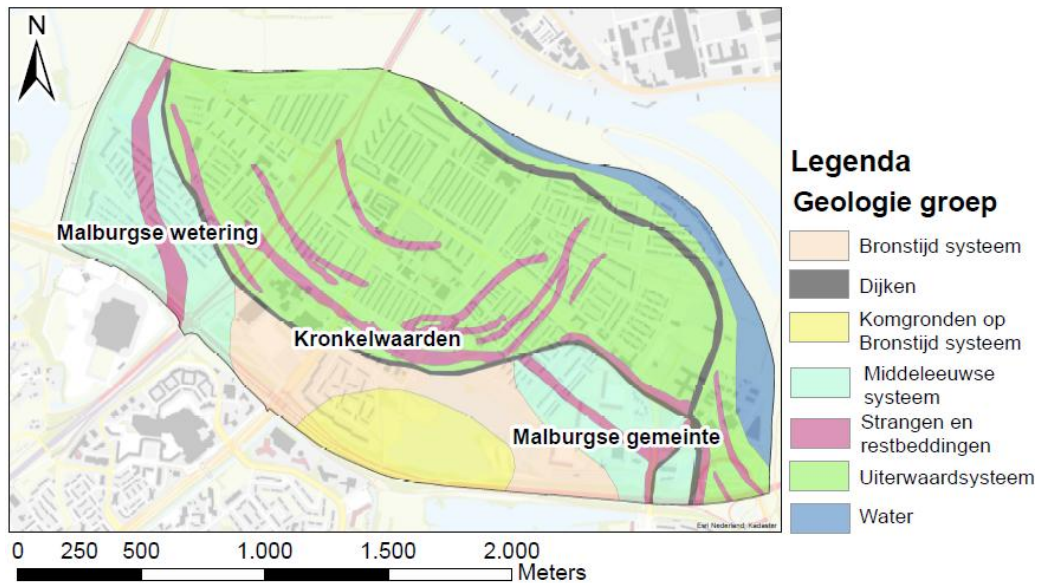
In deze paragraaf komt de ontwikkeling van het watersysteem Malburgen over de tijd naar voren. De transformatie van Malburgen als uiterwaardgebied naar Malburgen als onderdeel van een stedelijk watersysteem met verbinding naar de Betuwe staat hierbij centraal.

3.4.1 Uiterwaardsysteem Malburgen en omgeving

Het watersysteem van Malburgen kon voor zeer lange tijd getypeerd worden als een uiterwaardsysteem, waarin het gebied sterk onder invloed van de rivier stond. In Malburgen en omgeving zijn tijdens het Holoceen stroomruggen en kommen ontstaan als gevolg van de meanderende rivier (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

In figuur 6 zijn ontwikkelingen gedurende het Holoceen weergegeven in de vorm van verschillende geologische groepen in het projectgebied (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004). In paragraaf 3.4.1.1 worden de verschillende geologische groepen en bijbehorende tijdsperiodes uitgelicht.

In paragraaf 3.4.1.2 wordt het ontstaan van Malburgen als wijk van Arnhem beschreven.



figuur 6: Globale schets van geologie Malburgen
(J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004)

3.4.1.1 Geologische tijdperken

In het zuidelijk deel van Malburgen is het Bronstijd systeem te vinden, zie figuur 6. De afzettingen van de Bronstijd (circa 2000 tot 700 v. Chr.) zijn aangetroffen op 1,50 – 3 meter beneden maaiveld en betreffen hoofdzakelijk fijn zandige, zware zavel en lichte klei met kalkrijk, zeer fijn tot matig fijn zand (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

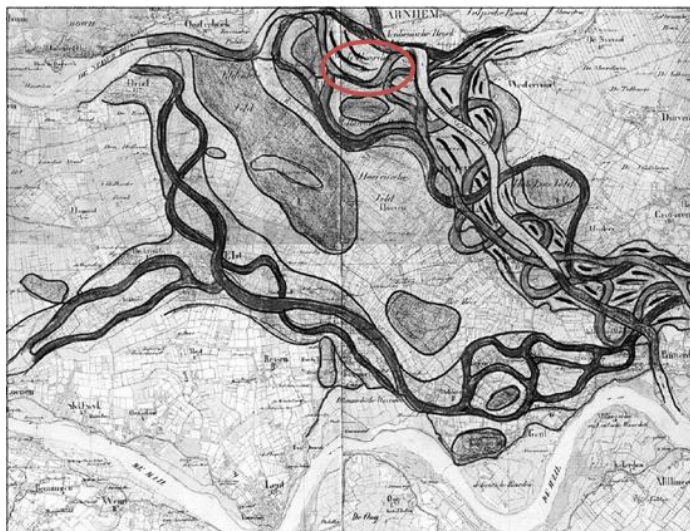
De stroomruggen van het Bronstijd systeem in Malburgen maken deel uit van de prehistorische Gelderse IJssel (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

In de periode tussen de Bronstijd en het middeleeuwse systeem (circa 700 – 250 v. Chr.) veranderde er in Malburgen niet zoveel. In het middeleeuwse systeem ontwikkelde de Waal zich tot de belangrijkste rivier. De oude Rijnloop verlandde en de nieuwe Rijnloop liep via Malburgen richting het westen. In de buurt van Malburgen splitste de IJssel van de Rijn af. De stroomruggen van de Rijn en IJssel uit het middeleeuwse systeem zijn in figuur 6 aangegeven als respectievelijk de Malburgse Wetering en de Malburgse Gemeente (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

Vooral in het oostelijk deel van Malburgen worden de invloeden van het middeleeuwse systeem teruggevonden in de vorm van matig fijne tot grove zanden, afgedekt door een laag kalkrijke zavel- en klei (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

Toen de Betuwe aan het eind van de dertiende eeuw vrijwel geheel bedijkt was, nam de dynamiek van de rivieren geleidelijk af. Het projectgebied Malburgen daarentegen functioneerde nog steeds als uiterwaard. De Rijn- en IJssel arm, die in de Middeleeuwen waren ontstaan in Malburgen, verzandden geleidelijk. De oude Rijnloop, welke de Malburgse wetering werd genoemd, werd door bewoners van Malburgen gebruikt om overtollig kwel- en regenwater af te voeren. Na de Middeleeuwen verschoof het splitsingspunt tussen Rijn en IJssel naar het noorden. De loop van de Rijn werd bovenstrooms van het splitsingspunt steeds rechter, maar vanaf Malburgen kreeg de Rijn een meanderend karakter, daardoor ontstonden kronkelwaarden in Malburgen, zie daarvoor figuur 6. In het midden van de zestiende eeuw was de Rijn zover van de stad Arnhem verwijderd dat is besloten om de meander kunstmatig af te snijden. De meander van de IJssel die door Malburgen liep, is in het jaar 1777 afgesneden. Hierdoor splitste de IJssel in het oosten van Malburgen van de Rijn af (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

De afzettingen van de periode na de Middeleeuwen, waarin Malburgen nog als uiterwaard functioneerde, worden getypeerd door kalkrijke grove zanden, afgedekt met een laag zavel. Als gevolg van dijkdoorbraken zijn op diverse plaatsen kolken ontstaan waar ook overslaggronden zijn te vinden (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).



figuur 7: Reconstructie verschillende lopen van de rivier sinds de Bronstijd (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004)

In figuur 7 is de dynamische verplaatsing van de rivierlopen sinds de Bronstijd weergegeven. Malburgen is in deze kaart met rode omlijning gemarkeerd

3.4.1.2 Ontstaan van Malburgen als wijk van Arnhem

Aan het einde van de dertiende eeuw was Malburgen al gedeeltelijk ontgonnen. De bewoners hadden zich gevestigd op de stroomruggen, aangezien Malburgen nog buitendijks lag. Het moerassige, centrale komgebied was nog onbewoonbaar en deze werd dan ook begroeid door wilgen en elzenstruweel. Het komgebied van Malburgen was alleen in de zomer begaanbaar en werd gebruikt voor het vee (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

Het is onbekend wanneer de Malburgse dijk is gebouwd door de Malburgers, maar het was de eerste dijk die een deel van Malburgen beschermde tegen hoog water van de Rijn en IJssel. De Malburgse dijk is in figuur 6 weergegeven als de zuidelijke dijk die door Malburgen loopt (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

Uiteindelijk is de Malburgse banddijk aangelegd, zie figuur 3. Het westelijk deel is aangelegd in 1905 en het oostelijk deel dateert uit het midden van de achttiende eeuw. In 1935 is deze dijk met twee meter opgehoogd en vormde de nieuwe banddijk. Toen verzezen de eerste woningen in de stadswaarden. Dit het gebied tussen de oude Malburgse dijk en de nieuwe Malburgse banddijk, wat in figuur 6 is weergegeven als uiterwaardsysteem. Dit was het begin van de uitgestrekte wijk Malburgen (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

3.4.2 Stedelijk watersysteem Malburgen en omgeving

Vanaf 1935 maakten oude boerderijen, verkavelingpatronen, weteringen en vele dijken en wegen plaats voor nieuwe woonwijken, industrieterreinen, kantoorcomplexen en autowegen (J.R. Mulder, L.J. Keunen & A.J.M. Zwart, 2004).

Het uiterwaardsysteem van Malburgen werd vervangen door een stedelijk watersysteem, waarin het gebied niet meer onderhevig is aan overstromingen en waarin de natuurlijke dynamiek van het water is afgenomen.

Het stedelijk watersysteem van Malburgen was onderdeel van een gesloten watersysteem in Arnhem-Zuid. Dit houdt in dat water door Arnhem-Zuid circuleerde en dat er geen verbindende watergang met omliggende watersystemen was (Waterschap Rivierenland, 2002).

De waterlichamen in Arnhem-Zuid zijn veelal gegraven en het water werd vanuit de Rijkerswoerdse plassen door de waterlichamen van Arnhem-Zuid gepompt (R. Bos, 2015).

Het watersysteem was in eerste instantie vooral gericht op het afvoeren van water (Gemeente Arnhem, 2009). Overtollig water in Arnhem-Zuid werd via twee gemalen uitgeslagen naar de Rijn, maar er werd niet zozeer ingespeeld op het vasthouden van water voor droge periodes (Waterschap Rivierenland, 2002).

Dit resulteerde in problemen gedurende droge periodes, wanneer het oppervlaktewater wegzijgt naar het grondwater en watergangen in onder ander Malburgen dreigen droog te vallen (Gemeente Arnhem, 2009). Om droogvallende watergangen tegen te gaan is het gesloten watersysteem van Arnhem-Zuid aangepast, zodat het beter water vasthoudt (Gemeente Arnhem, 2009).

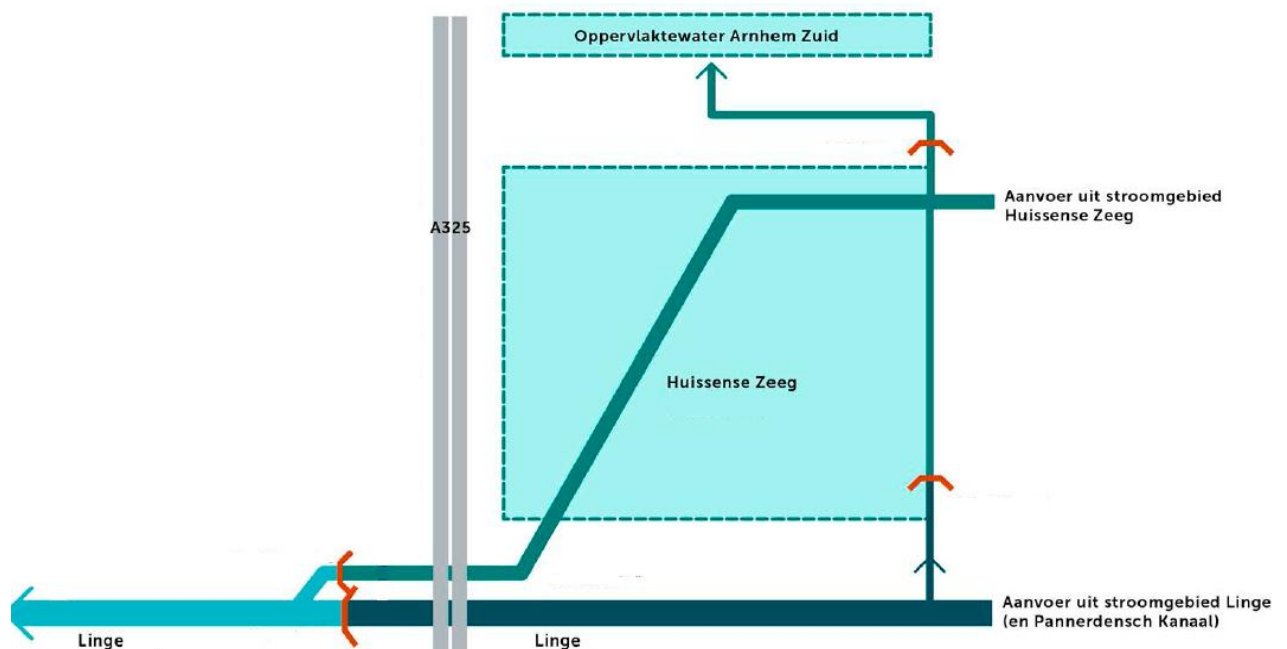
De watergang langs de Malburgse bandijk is geïsoleerd door drie stuwtjes, zodat waterverliezen door wegzijging beperkt worden. Daarnaast zorgt een opvoergemaal in de wijk ten zuiden van Malburgen ervoor dat er water naar Malburgen wordt gepompt om droogval te voorkomen en de watercirculatie in stand te houden (Waterschap Rivierenland, 2002).

Echter, deze maatregelen bleken niet genoeg om de watercirculatie in Arnhem-Zuid te handhaven gedurende droge periodes. Soms daalde de waterstand zo ver dat er werd geklaagd over stank en een slechte beeldkwaliteit (Waterschap Rivierenland, 2002).

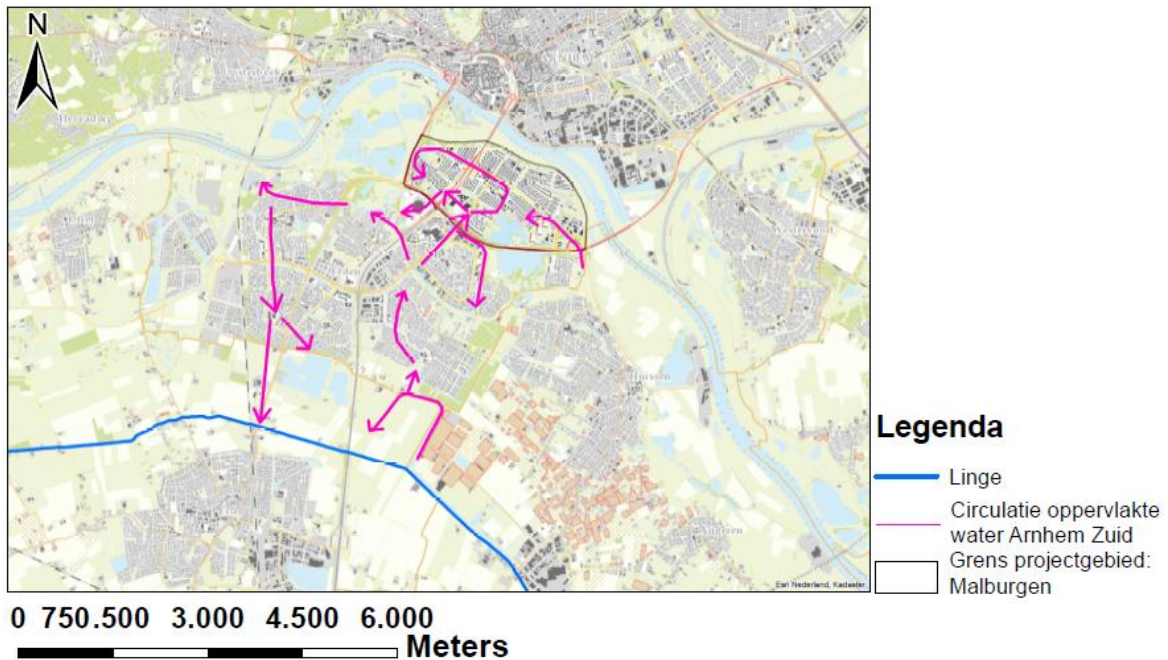
In 2002/2003 is het gesloten watersysteem van Arnhem-Zuid in verbinding gebracht met de Linge in de Betuwe, zie figuur 8 (R. Bos, 2015).

De water inlaat vanuit de Linge moet droogvallen van de watergangen in de hogere delen van Arnhem, waaronder Malburgen, voorkomen. Het wateroverschot wordt uitgemalen naar de Nederrijn of via andere wijken in Arnhem Zuid op de Linge geloosd (Gemeente Arnhem, z.d.).

In figuur 9 is de huidige watercirculatie van Arnhem-Zuid te zien (R. Bos, 2015). De aan- en afvoer van water houdt het watersysteem van Malburgen op een zomer- en een winter streefpeil, welke het waterschap Rivierenland sinds 2012 heeft ingesteld (Algemeen bestuur waterschap Rivierenland, 2012).



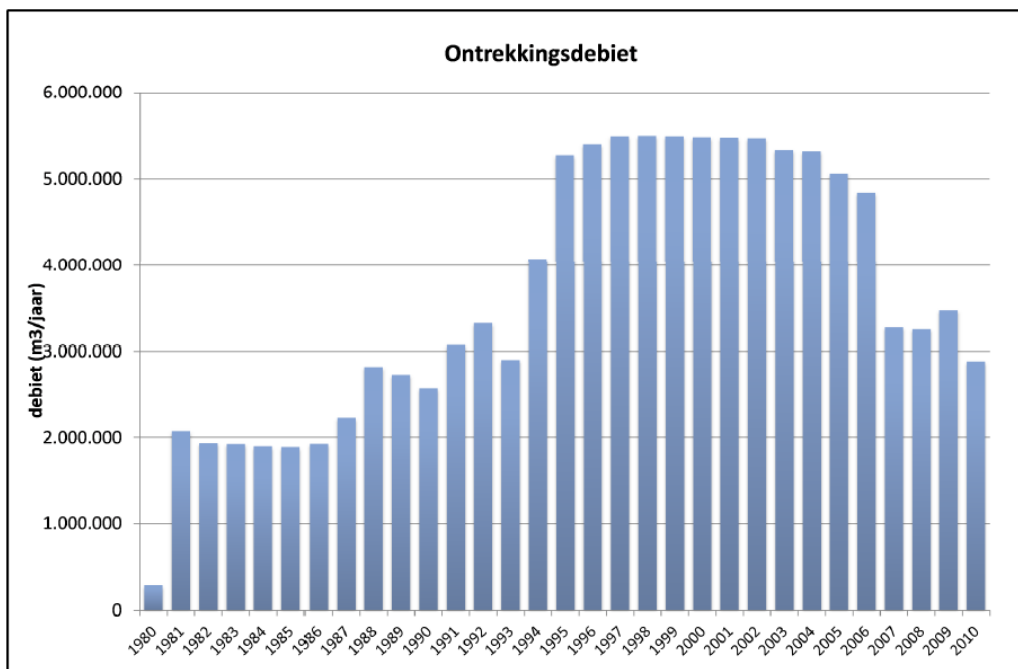
figuur 8: Verbinding tussen de Linge en oppervlakte water Arnhem-Zuid (J. Bosch, E. De Mey, T. de Weerd, 2013)



figuur 9: Huidige watercirculatie Arnhem-Zuid (Kadaster en RUG Geodienst, 2014; R. Bos, 2015)

Wat betreft riolering, beschikt het watersysteem van Malburgen sinds de Tweede Wereldoorlog over een gescheiden rioolstelsel. Dit stelsel voert het hemelwater af naar het oppervlaktewater en het vuilwater naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (Stadsbeheer, 2007).

Het grondwater van Malburgen staat sinds 1980 onder invloed van het pompstation Ir. H. Sijmons (hierna te noemen drinkwaterwinning Sijmons). Dit pompstation onttrekt maximaal 5,5 miljoen m³ grondwater per jaar ten behoeve van drinkwatervoorziening. In figuur 10 zijn de hoeveelheden onttrokken grondwater weergegeven over de tijd (I.M. Folmer, F. C. J. van Herpen, L. Gommers-Verbeek, A. Krikkek, 2012).



figuur 10: Onttrekking van grondwater door drinkwaterwinning Sijmons sinds 1980

Daarnaast wordt ook grondwater afgevoerd door buisdrainage dat, gedurende de herinrichting van de wijk Malburgen in het afgelopen decennium, is aangelegd in delen van Malburgen – West en –Oost (R. Bos, 2015).

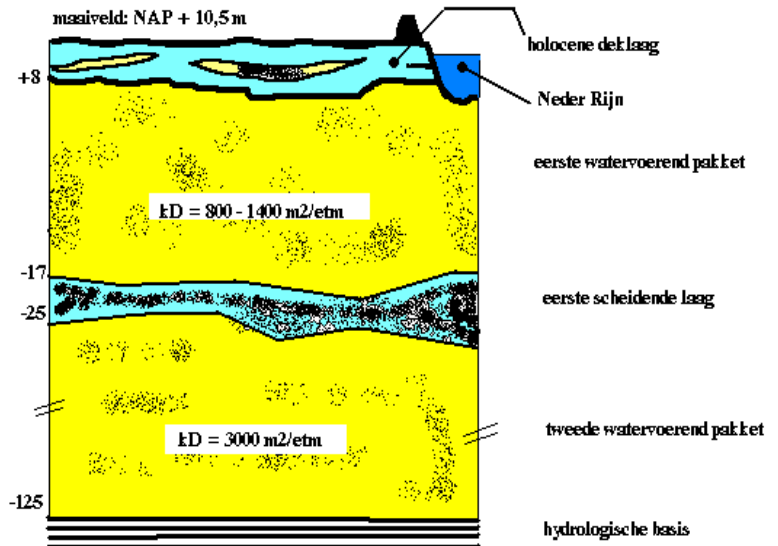
3.5 Geohydrologie en hydrologie

In deze paragraaf wordt de huidige geohydrologie en hydrologie van projectgebied Malburgen beschreven. De geologie, het grondwater en het oppervlaktewater worden behandeld om een beeld te schetsen van het huidige watersysteem.

3.5.1 Geologie

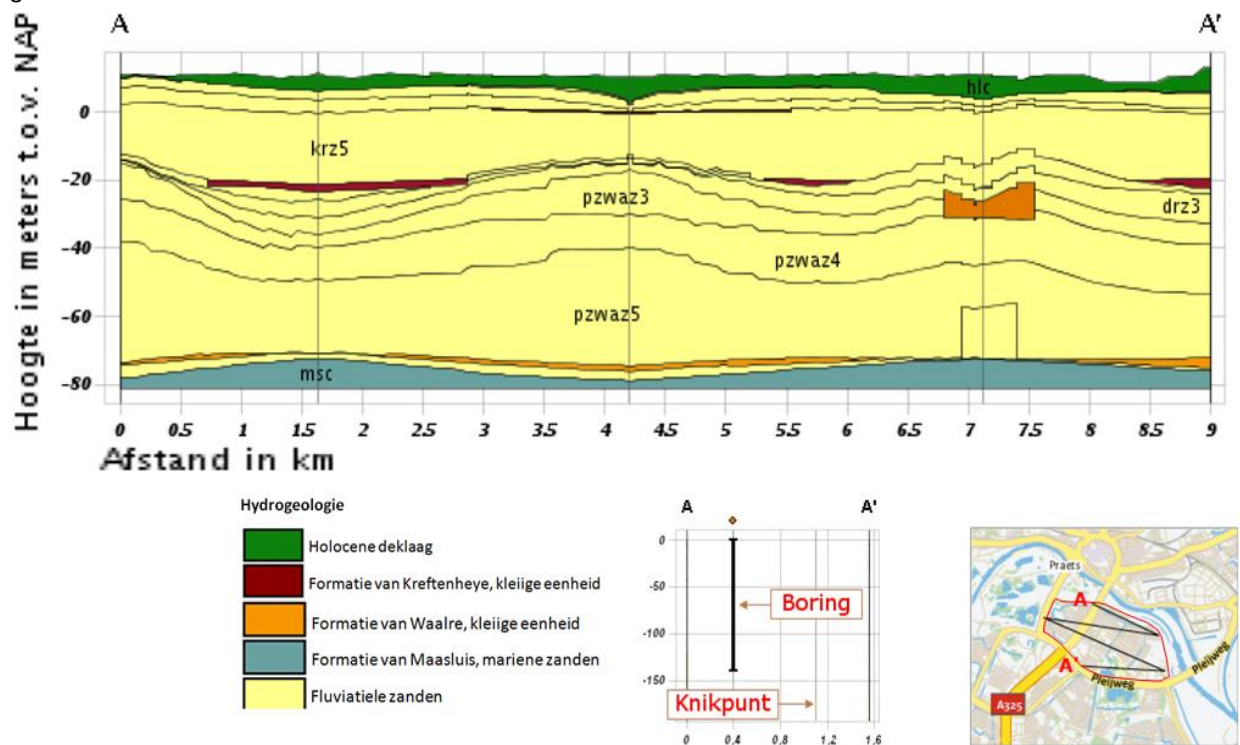
De toplaag van het projectgebied heeft veelal een dikte van circa 120 centimeter en wordt gerekend tot de kalkhoudende ooivaaggronden (Grontmij, 2001).

De toplaag is onderdeel van de holocene deklaag in Malburgen, die varieert tussen een halve en zes meter dikte, zie figuur 12 (Regis II v2.1, z.d.). De deklaag behoort tot de Betuwe formatie en is opgebouwd uit zware zavel tot lichte klei met op sommige locaties ingeschaalde zandlagen (Grontmij, 2001). In figuur 11 is een schematisering van de bodemopbouw in De Bakenhof weergegeven, een gebied in het oostelijk deel van Malburgen. Tot



figuur 11: Schematisering bodemopbouw Bakenhof (Grontmij, 2001)

een dikte van drie meter wordt de c-waarde van de holocene deklaag geschat op 20 etmaal en tot een dikte van vijf meter op 80 etmaal (Grontmij, 2001). In het gebiedsdossier van drinkwaterwinning Sijmons wordt uitgegaan van een c-waarde van de holocene deklaag variërend van 50 tot 700 etmaal (I.M. Folmer, F. C. J. van Herpen, L. Gommers-Verbeek, A. Krikke, 2012). De weerstand van de deklaag is dus heel variabel over het projectgebied.



figuur 12: Dwarsdoorsnede ondergrond Malburgen (Regis II versie 2.1, z.d.)

Tussen de deklaag en de geohydrologische basis, is de ondergrond opgebouwd met afwisselend slecht doorlatende lagen en watervoerende pakketten, zie figuur 12 (Regis II v2.1, z.d.). De watervoerende pakketten bestaan uit matig fijne tot zeer grove, fluviatiele zanden. Mariene zanden kunnen aangetroffen worden op een diepte van meer dan 70 meter onder het maaiveld (Regis II v2.1, z.d.).

Uit figuur 12 blijkt dat de watervoerende pakketten van de Bakenhof, die geïsoleerd worden door scheidende lagen zoals is weergegeven in figuur 11, uiteindelijk wel met elkaar in verbinding staan als de geologie van de hele wijk wordt bestudeerd (Regis II v2.1, z.d.). Het watervoerende pakket van Kreftenheye, wat tot ongeveer 20 meter beneden NAP hoogte ligt, heeft een gemiddelde doorlaatfactor van 40 meter per etmaal. In de watervoerende pakketten dieper dan 20 meter beneden NAP is dit circa 30 meter per etmaal (Grontmij, 2001). De gemiddelde doorlaatfactor maal de dikte van het watervoerende pakket geeft de kD-waarde van het watervoerende pakket, zoals is weergegeven in figuur 11.

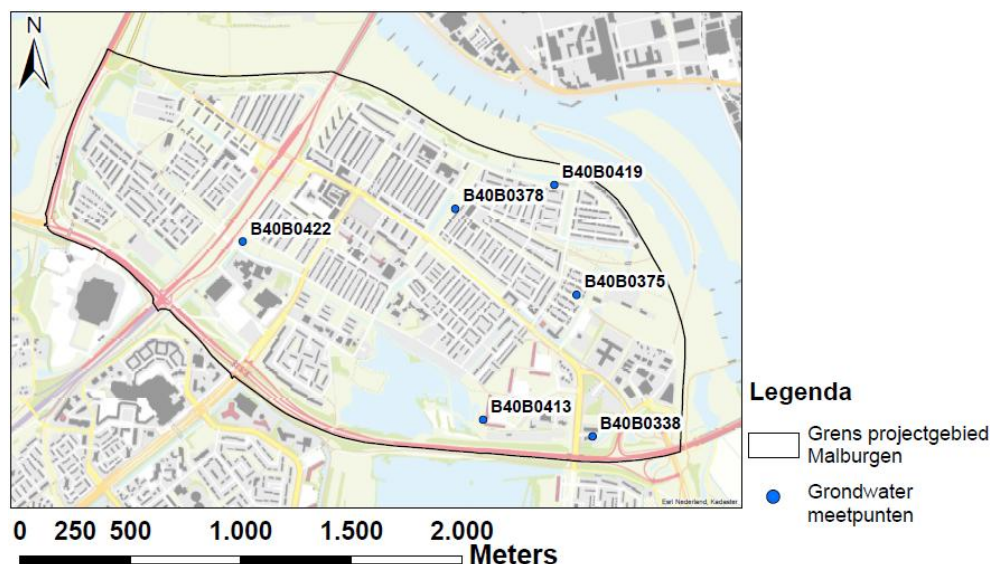
Het westelijk deel van Malburgen heeft rond 0 meter + NAP (hierna te noemen: NAP hoogte), een circa 30 centimeter dikke scheidende laag van de formatie van Kreftenheye. Het oostelijk deel van Malburgen heeft een scheidende laag van de formatie van Kreftenheye met een dikte van 1,5 meter op ongeveer 20 meter beneden NAP hoogte liggen. Rondom de Bakenhof, dus in het uiterst oostelijk deel van de woonwijk, ligt een scheidende laag van de formatie van Waalre met een dikte tot 13 meter. Deze laag ligt op een diepte van ongeveer 17 meter beneden NAP hoogte. Op 76 meter beneden NAP hoogte ligt in het midden en westen van Malburgen een 1,5 meter dikke scheidende laag van de formatie van Waalre (Regis II v2.1, z.d.). De formatie van Breda vormt de geohydrologische basis van Malburgen en ligt op een diepte van circa 150 meter beneden NAP hoogte (Regis II v2.1, z.d.).

3.5.2 Grondwater

In deze paragraaf zijn de gemeten stijghoogtes van het projectgebied opgenomen en geanalyseerd. Het verband tussen de waterstanden in de Nederrijn en de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket is ook onderzocht. Bovendien worden grondwateronttrekkingen en de grondwaterkwaliteit ter sprake gebracht.

3.5.2.1 Stijghoogtes eerste watervoerende pakket

In figuur 13 zijn de locaties van de stijghoogte meetpunten van het grondwater in Malburgen weergegeven.



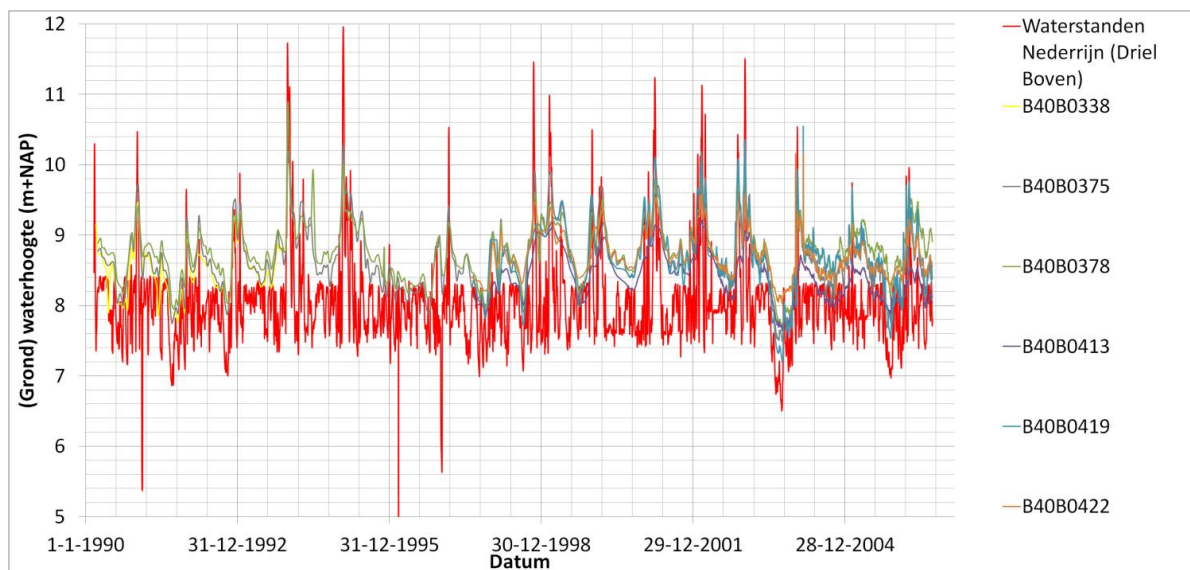
figuur 13: locaties stijghoogte meetpunten van het grondwater (DINOloket, z.d)

De stijghoogtes van het eerste watervoerende pakket zijn op de meest locaties vrijwel identiek aan de stijghoogtes dieper in de ondergrond. Peilbuis B40B0375 heeft zelfs overal, tot op een diepte van circa 147 meter onder het maaiveld, vrijwel identieke stijghoogtes. Alleen peilbuis B40B0413 laat duidelijk verschillende stijghoogtes zien tussen het eerste filter en de overige filters. Hoogstwaarschijnlijk als gevolg van een scheidende laag op een diepte ergens tussen de 21 en 35 meter onder het maaiveld.

Het verloop van de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket gedurende de periode 1990 – 2006 is grafisch weergegeven in figuur 14. Voor een vergrote weergave van deze grafiek, zie bijlage 1.

In deze grafiek zijn stijghoogtes tot een maximale hoogte van circa 10,50 meter boven NAP te zien, zoals bijvoorbeeld in 1993 en 1995. Daartegenover staan lage stijghoogtes, zoals in de droge zomer van 2003 toen de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket uitzakte tot circa 7,50 meter boven NAP. Het grondwater in de 'zandbak' waar de woonwijk Malburgen op is gebouwd, is gevoelig voor flinke fluctuaties die kunnen oplopen tot 3 meter.

Er is geen duidelijke daling of stijging te zien in de gemiddelde stijghoogte over de periode 1990 tot 2006. Gemiddeld genomen staat de stijghoogte rond 8,50 meter boven NAP.



figuur 14: Grondwater stijghoogtes eerste watervoerende pakket en waterstanden Nederrijn (Driel Boven) in de periode 1990 - 2006 (DINOloket, z.d.; Waterbase, z.d.)

In tabel 2 is een analyse weergegeven van de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket in de periode 1998 – 2006. De rekenmethode achter deze analyse is terug te vinden in bijlage 2

Locatie B40B0375 heeft, wat betreft de gemiddelde hoogste grondwaterstand (hierna te noemen: GHG), de kleinste ontwateringdiepte en, wat betreft de gemiddelde laagste grondwaterstand (hierna te noemen: GLG), heeft locatie B40B0422 de kleinste ontwateringdiepte. De grootste ontwateringdiepte heeft locatie B40B0413 als het gaat om GHG en GLG. De gemiddelde ontwateringdiepte is op dit punt ook het grootst met 2,51 meter beneden het maaiveld. Op locatie B40B0422 staat de grondwaterstand met gemiddeld 1,55 meter het dichtst tegen het maaiveld aan.

De fluctuatieruimte tussen de GLG en GHG, ter plaatse van de meetpunten, varieert tussen 0,93 en 1,69 meter. Tussen de maximale en minimale grondwaterstand ligt de fluctuatieruimte tussen 1,55 en 3,36 meter. De meeste fluctuaties treden op bij de punten B40B0419, B40B0375 en B40B0338, die gelegen zijn aan de oostelijke grens van Malburgen. Waarschijnlijk reageren deze meetpunten snel op de veranderlijke rivierstanden, aangezien ze dicht bij de rivier zijn gelegen.

Meetpunt	Maaiveld hoogte			Gemiddelde laagste grondwaterstand		Gemiddelde voorjaar grondwaterstand		Gemiddelde grondwaterstand		Maximale grondwater stand		Minimale grondwaterstand	
nr.	m+NAP	m+NAP	m-mv.	m+NAP	m-mv.	m+NAP	m-mv.	m+NAP	m-mv.	m+NAP	m-mv.	m+NAP	m-mv.
B40B0338	10,76	9,52	1,24	8,13	2,63	9,03	1,73	8,42	2,34	10,47	0,29	7,52	3,24
B40B0375	10,14	9,76	0,38	8,07	2,07	9,12	1,02	8,54	1,60	10,30	-0,16	7,49	2,65
B40B0378	10,87	9,57	1,30	8,27	2,60	9,18	1,69	8,73	2,14	10,04	0,83	7,67	3,20
B40B0413	10,80	8,88	1,92	8,06	2,74	8,78	2,02	8,29	2,51	9,21	1,59	7,65	3,15
B40B0419	10,55	9,74	0,82	8,05	2,50	8,05	2,50	8,57	1,98	10,55	0,00	7,19	3,36
B40B0422	10,16	9,30	0,86	8,37	1,79	9,00	1,16	8,61	1,55	9,58	0,58	8,03	2,13

tabel 2: Analyse grondwater stijghoogtes eerste watervoerende pakket in Malburgen in de periode 1998-2006 (DINOloket, z.d.)

3.5.2.2 Grondwaterstromen

Er is een diepe en een ondiepe grondwaterstroming te onderscheiden in Malburgen (Gemeente Arnhem, 2007^a).

De diepe grondwaterstroming is globaal van noord naar zuidwest gericht. Deze stroming is op grotere, regionale schaal te vinden en stroomt van de Veluwe, onder de Nederrijn door, naar de Betuwe (Gemeente Arnhem, 2007^a).

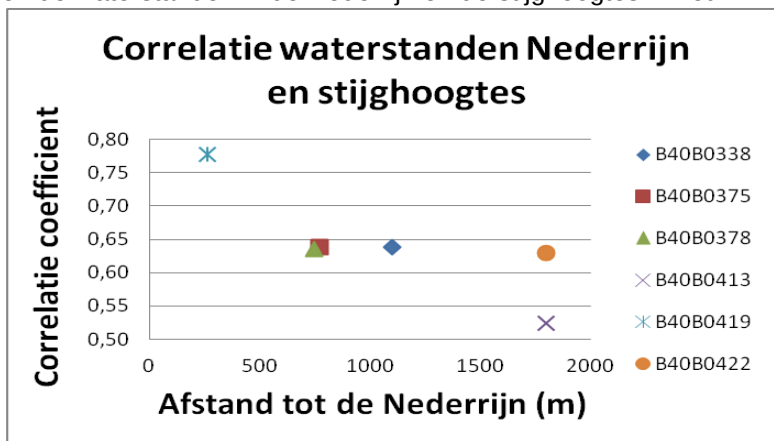
Het freatisch grondwater staat onder invloed van de ondiepe grondwaterstroming die afhankelijk is van de waterstanden in de Nederrijn. Bij lage rivierstanden zal er water uit Malburgen worden gedraineerd en worden afgevoerd door de Nederrijn. Bij hoge rivierstanden is deze grondwaterstroming tegengesteld en stroomt er juist water vanuit de Nederrijn het projectgebied binnen (Gemeente Arnhem, 2007^a). Verwacht wordt dat bij hoog water de ondiepe grondwaterstroming in Malburgen niet alleen een noord-zuid richting heeft, maar lokaal ook een oost - west oriëntatie (R. Lohrmann, 2012).

Aangezien grond- en oppervlaktewater met elkaar in verbinding staan, is de grondwaterstand in het projectgebied erg bepalend voor de oppervlaktewaterstand als er niet door menselijk ingrijpen water wordt aan- of afgevoerd. Een grondwaterstand hoger dan het oppervlaktewaterpeil resulteert in aanvulling van het oppervlaktewater vanuit het grondwater. Een grondwaterstand die lager staat dan het oppervlaktewaterpeil resulteert in infiltratie van het oppervlaktewater, waardoor het grondwater wordt aangevuld (Gemeente Arnhem, 2009).

Kwel en wegzijging zijn twee belangrijke processen in de wijk Malburgen, aangezien ze erg bepalend zijn voor de grondwaterstand (R. Lohrmann, 2012) en daarmee dus ook veel invloed uitoefenen op het oppervlaktewater.

Kwel en wegzijging worden in het projectgebied voornamelijk bepaald door de rivierstanden in de Nederrijn. De samenhang tussen de waterstanden in de Nederrijn en de stijghoogtes in het

eerste watervoerende pakket is te zien in figuur 14. In figuur 15 is de correlatie tussen de waterstanden in de Nederrijn en de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket uitgezet tegen de afstand tot de Nederrijn. De grafiek laat zien dat er een verband is tussen de afstand tot de Nederrijn en in hoeverre de stijghoogtes correleren met de waterstanden in de Nederrijn. De stijghoogtes komen meer overeen met de waterstanden in de Nederrijn, naarmate de afstand tot de Nederrijn kleiner wordt.



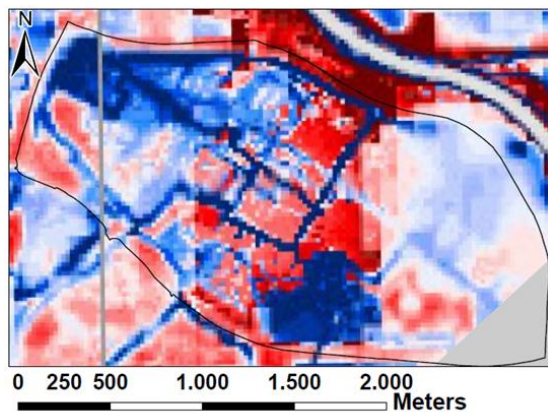
figuur 15: Correlatie waterstand Nederrijn (Driel Boven) en stijghoogtes eerste watervoerende pakket in de periode 13 juni 2002 - 19 september 2006. (DINOloket, z.d.; Waterbase, z.d.)

Het waterpeil van de Nederrijn fluctueert grofweg tussen 6,0 meter + NAP in een droge situatie en 13,9 meter + NAP bij een maatgevende hoogwatergolf (R. Lohrmann, 2012). Onder droge en gemiddelde omstandigheden is er vooral sprake van grondwater dat vanuit het watervoerend pakket in Malburgen uittreedt naar de rivier (R. Lohrmann, 2012). In tijden van hoogwater infiltreert water uit de Nederrijn naar het eerste watervoerende pakket, wat vervolgens richting de wijk Malburgen stroomt en in binnendijkse watergangen omhoog kwelt (R. Lohrmann, 2012). Daarnaast stroomt met de diepe grondwaterstroming water vanaf de Veluwe naar de wijk Malburgen, waar het vervolgens omhoog kwelt.

Om kwel en wegzijging in de Betuwe te berekenen zijn in een watersysteembeschrijving van de Overbetuwe berekeningen uitgevoerd met een grondwatermodel, genaamd MORIA. Deze afkorting staat voor Modellering Ondergrond Rivierenland Interactief en Actueel en is in 2008 speciaal voor het rivierengebied opgezet (H. Th. L. Massop, 2014).

In figuur 16 en figuur 17 zijn MORIA kaarten opgenomen die de hoeveelheden kwel en wegzijging in Malburgen tijdens de hoogwatergolf van 1995 en het laagwater van 2003 weergeven. Opvallend zijn de open waterlichamen in het centrale deel van Malburgen die bij hoge waterstanden tot ruim 4 millimeter per dag aan kwel ontvangen, terwijl diezelfde waterlichamen in tijden van droogte tot 3 millimeter per dag draineren.

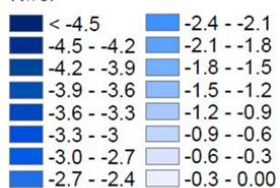
Tussen de watergangen in het centrale deel van Malburgen treedt zowel bij hoog- als laagwater wegzijging op. Terwijl Malburgen-West en -Oost in de natte situatie voornamelijk met kwel te maken hebben en in de droge situatie voornamelijk met wegzijging.



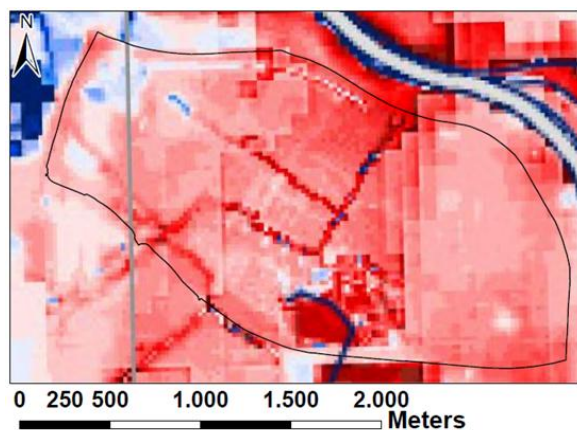
Legenda

Flux mm/dag (berekend)

Kwel



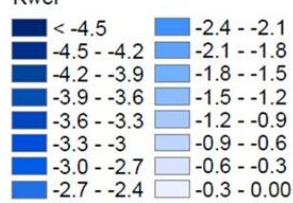
Wegzijging



Legenda

Flux mm/dag (berekend)

Kwel



Wegzijging

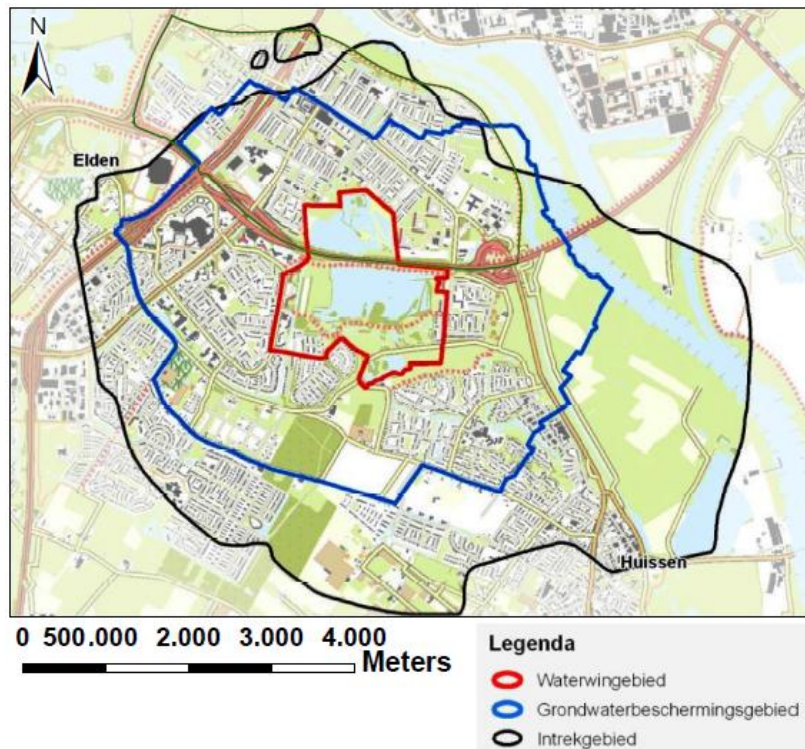


figuur 16: Kwel en wegzijging hoogwater 19-02-1995 (H. Th. L. Massop, 2014)

figuur 17: Kwel en wegzijging laagwater 14-08-2003 (H. Th. L. Massop, 2014)

3.5.2.3 Grondwateronttrekking

In figuur 18 is het invloedsgebied van drinkwaterwinning Sijmons weergegeven. De drinkwaterwinning heeft de winpunten rond Immerloo plas staan, wat de waterplas ten zuiden van Eimersweide is (R. Lohrmann, 2012).



figuur 18: Drinkwateronttrekking Sijmons (I.M. Folmer, F.C.J. van Herpen, L. Gommers-Verbeek en A. Krikken, 2012)

Malburgen ligt grotendeels in het grondwaterbeschermingsgebied, wat inhoudt dat het water in dit gebied tussen één en 25 jaar wordt opgepompt. De drinkwaterwinning Sijmons mag 5,5 miljoen m³ per jaar onttrekken en wint dit op een diepte van 30 - 70 meter beneden het maaiveld. Momenteel wordt circa 3,2 miljoen m³ water per jaar onttrokken. Dit water wordt gewonnen uit het tweede watervoerende pakket, wat wordt afgedekt door een slecht doorlatende laag. Echter, zoals al in paragraaf 3.5.1 is beschreven, ligt er geen aaneengesloten kleilaag in het gebied, waardoor ook het freatische grondwater en het eerste watervoerende pakket worden beïnvloedt door de onttrekking (I.M Folmer, F.C.J. van Herpen, L. Gommers-Verbeek en A. Krikken, 2012). Dit vermoeden wordt bevestigd doordat een mix van Veluwe grondwater, lokaal geïnfiltreerd grondwater en Rijnwater wordt gewonnen door dit station (R. Lohrmann, 2012).

Daarnaast wordt ook nog grondwater afgevoerd door aangelegde buisdrainage in delen van Malburgen-West en -Oost. Deze drainage is als extra zekerheid aangelegd en is bedoeld om grondwaterpieken af te vangen. Het is niet bedoeld om de grondwaterstand structureel te verlagen. De drainagebuizen liggen circa 1 meter onder het maaiveld (R. Bos, 2015).

3.5.2.4 Grondwaterkwaliteit

De kwaliteit van het diepe grondwater in Malburgen is zo goed dat het bijna direct als drinkwater kan worden gebruikt. Dit komt door het lange verblijf in de bodem (Gemeente Arnhem, 2009). De diepe kwel afkomstig vanaf de Veluwe is naar verwachting zeer schoon. De rivierkwel is van mindere kwaliteit, al zal dit naar verwachting nog redelijk zijn, door het passeren van de bodem (R. Lohrman, 2012).

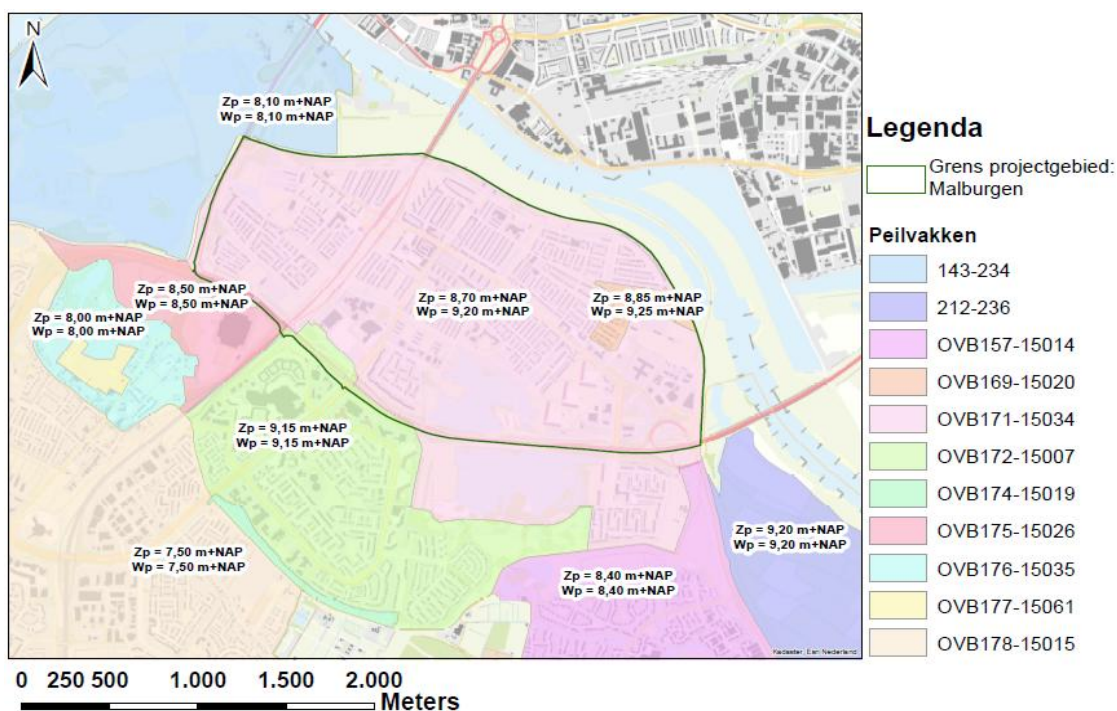
3.5.3 Oppervlaktewater

In deze paragraaf worden oppervlaktewaterstanden, stroomrichting en streefpeilen van het projectgebied ter sprake gebracht. Bovendien wordt er aandacht besteed aan het rioolstelsel en de kwaliteit van het oppervlaktewater.

3.5.3.1 Oppervlaktewaterstanden

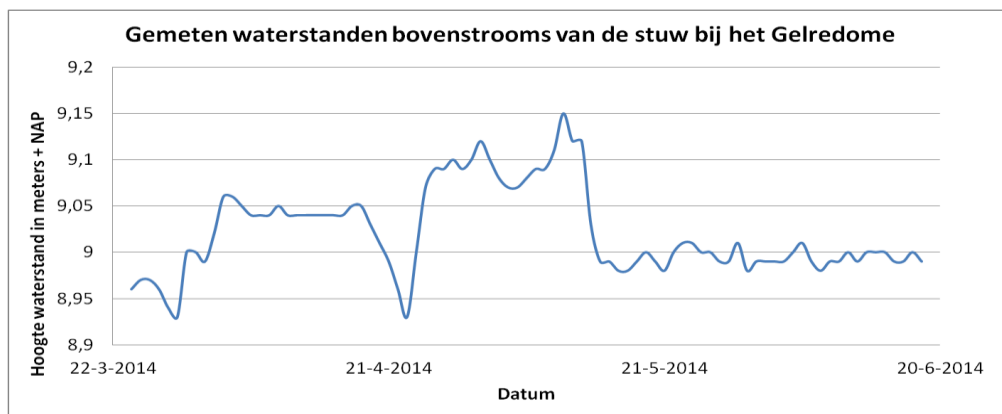
Het peilbeheer is vanaf 2002 officieel overgegaan van de gemeente Arnhem naar waterschap Rivierenland. (T.H. van Wee, 2012)

Figuur 19 presenteert de peilvakken in Malburgen en omgeving. In Malburgen wordt een zomer streefpeil van 8,70 meter + NAP en een winter streefpeil van 9,20 meter + NAP gehanteerd, zie figuur 19. Het oppervlakte water in de Bakenhof (peilvak: OVB169-15020) wordt op een aangepast zomer streefpeil van 8,85 meter + NAP en een winter streefpeil van 9,25 meter + NAP gehouden (Waterschap Rivierenland, 2013). Zoals te zien is in figuur 19, wordt in de wijk Malburgen een verschillend zomer en winter streefpeil gehanteerd, terwijl in de omliggende peilvakken een vast oppervlaktewaterpeil wordt gehanteerd.



figuur 19: Streefpeilen oppervlakte water (Waterschap rivierenland, z.d.^b)

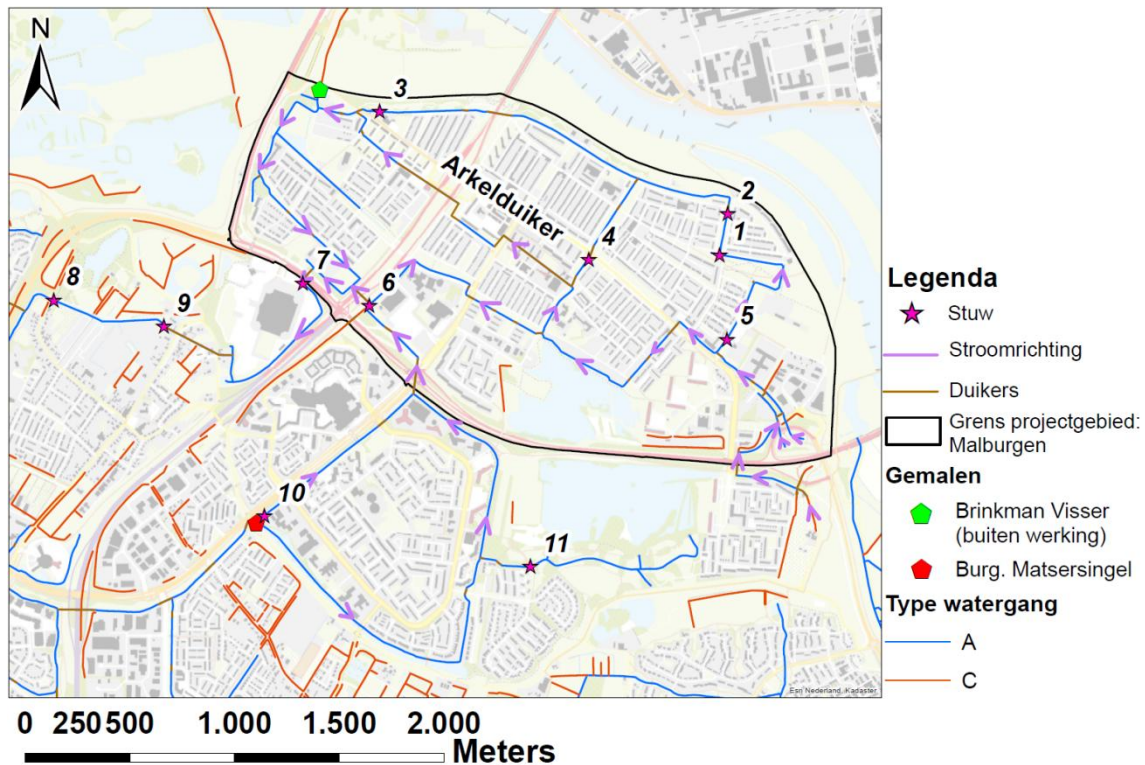
In figuur 20 zijn de gemeten waterstanden bovenstrooms van de stuw bij het Gelredome voor de periode maart 2014 – juni 2014 weergegeven. Deze stuw draagt in figuur 21 het nummer 7 en laat water uit het projectgebied stromen. Uit figuur 20 blijkt dat het waterpeil ook binnen de zomer- en de winterperiode fluctueert tussen 8,70 meter + NAP en 9,20 meter + NAP in Malburgen



figuur 20: Gemeten waterstanden in Malburgen maart 2014 – juni 2014 (Waterschap Rivierenland, z.d.¹)

3.5.3.2 Oppervlaktewaterstromen

Figuur 21 geeft de vermoedelijke stroomrichting van het oppervlaktewater in het projectgebied weer. Daarnaast zijn ook de watergangen en de kunstwerken van de wijk Malburgen te zien. Het figuur is opgesteld aan de hand van veldwerk, legger gegevens en advies van Ronald Bos. Het is aannemelijk dat de stroomrichting, zoals weergegeven in figuur 21, domineert gedurende het jaar. Er moet vermeld worden dat uit veldwerk is gebleken dat de stroomsnelheid beperkt is en dat de stroomrichting op sommige locaties kan wisselen, afhankelijk van de waterstanden in het gebied.



figuur 21: Oppervlaktewater en kunstwerken (Ronald Bos, 2015; Waterschap Rivierenland, z.d^b)

Uit figuur 21 blijkt dat gemaal Burgemeester Matsersingel water naar stuw 6 pompt. Dit water wordt rechtstreeks of met een boog om de woonwijk Vredenburg (de wijk tussen stuw 10 en stuw 11) naar de wijk Malburgen gebracht.

Bij stuw 6 stroomt een deel van het water via een duiker direct onder de Nijmeegse weg door naar stuw 7, vanwaar het water weer uit Malburgen verdwijnt. Het overige deel van het water bij stuw 6 stroomt in noordelijke richting, totdat het water ontmoet wat uit oostelijke richting komt stromen.

In het zuidoosten van Malburgen stroomt water de wijk binnen via twee vijvers en een sloot die gevoed wordt door hemel- en kwel water. Een deel van dit water stroomt in noordelijke richting naar stuw 5 en van daar door naar stuw 1. Voor de watergang tussen stuw 5 en stuw 1 gelden de streefpeilen van het peilvak Bakenhof. Vanuit het zuidoosten van het projectgebied stroomt ook een deel van het water in westelijke richting. Een gedeelte stroomt bij Eimersweide richting het noorden, waar het vervolgens via de Arkelduiker naar stuw 7 stroomt en het projectgebied verlaat. Het overig deel van het water in de watergang bij Eimersweide stroomt richting stuw 6, totdat het water ontmoet dat in tegengestelde richting stroomt.

Het water in het noordelijk deel van Malburgen kan geïsoleerd worden door stuw 2, 3 en 4. Deze sloot wordt gevoed door kwelwater en zal over het algemeen alleen in tijden van hoogwater, lozen op de rest van het watersysteem in Malburgen. In tijden van droogte worden de stuwjes vermoedelijk dusdanig ingesteld dat verlies van oppervlaktewater, als gevolg van wegzijging bij een lage rivierstand, wordt beperkt (R. Bos, 2015). Echter, uit veldwerk is gebleken dat er soms ook water in de kwelsloot wordt binnengelaten via stuw 3.

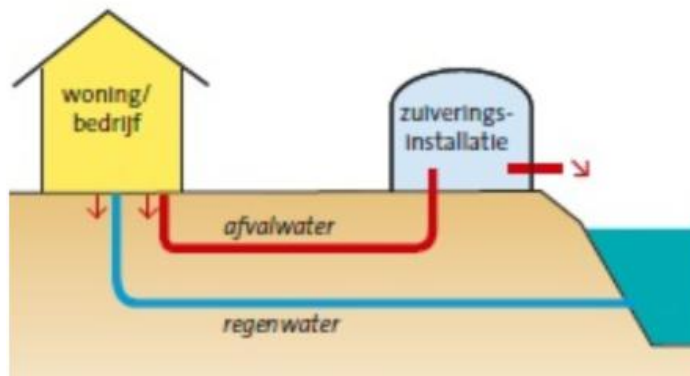
De verdeling tussen de hoeveelheid water dat door de Arkelduiker stroomt en de hoeveelheid water dat door de duiker onder de Nijmeegse weg stroomt, hangt af van de waterstanden in het watersysteem. In geval van lage waterstanden is het aannemelijk dat het overgrote deel van het water van stuw 6 direct onder de Nijmeegseweg naar stuw 7 stroomt, omdat dit de weg met de minste weerstand is.

3.5.3.3 Rioolstelsel

Het rioolstelsel van Malburgen is grotendeels gescheiden aangelegd, zie figuur 22 (Witteveen en Bos, 2011).

Echter, circa 8% van het totaal verhard oppervlak in het projectgebied heeft nog een gemengd stelsel en voert regenwater dus af naar de rioolwaterzuiveringinstallatie (Witteveen en Bos, 2011).

Het overig verhard oppervlak loost regenwater op het hemelwater afvoer stelsel, wat via verschillende overstorten in verbinding staat met het oppervlaktewater van Arnhem-Zuid (Witteveen en Bos, 2011).



figuur 22: Gescheiden rioolstelsel (Waterschap Rivierenland, z.d.⁴)

3.5.3.4 Oppervlaktewaterkwaliteit

Het waterschap Rivierenland draagt ook zorg voor de oppervlaktewaterkwaliteit in Malburgen (Gemeente Arnhem, 2007^a). In vergelijking met andere stedelijke gebieden, is de oppervlaktewaterkwaliteit in Malburgen redelijk te noemen.

De nitraatgehalten zijn in heel Arnhem-Zuid over het algemeen laag (Waterschap Rivierenland, 2002). Onderzoek heeft uitgewezen dat doorzicht en de chloride, fosfaat en stikstofgehalten op de drie meetlocaties in Arnhem-Zuid aan de normen van de Vierde Nota Waterhuishouding voldoen (Waterschap Rivierenland, 2012). Echter, in de zomer en het najaar komen lage zuurstofgehalten voor (Waterschap Rivierenland, 2002). Daarnaast zijn er zware metalen in het oppervlaktewater van Arnhem-Zuid aangetroffen (C. J. W. Vermulst, L.J. Broersma, M. Maessen, 2006). De streefwaardes voor zware metalen, zoals gesteld in de Vierde Nota Waterhuishouding, worden in Malburgen regelmatig overschreden (Gemeente Arnhem, 2007^b). Over het algemeen blijkt dat op de locaties waar het water het meest dynamisch is, ook de beste waterkwaliteit optreedt (Waterschap Rivierenland, 2002).

4 Analyse werking van watersysteem Malburgen gedurende een droge periode

In dit hoofdstuk is een analyse opgenomen van de werking van het watersysteem Malburgen gedurende een droge periode.

In de eerste twee paragrafen zijn het spreadsheetmodel en het Sobek model geverifieerd, volgens de methodiek van paragraaf 2.1.2. Na de verificatie is per model een waterbalans berekend voor de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003. Deze periode valt binnen een droogte die eens in de tien jaar optreedt, gedefinieerd als een droogte $T=10$. Uit deze periode wordt duidelijk wat het gebied kwetsbaar maakt voor waterverliezen.

Vervolgens zijn aan de hand van de waterbalansen uitspraken gedaan over de werking van het watersysteem gedurende een droge periode. Door op de hoogte te zijn van de belangrijkste in- en uitposten op de waterbalans gedurende een droge periode, kan in hoofdstuk 6 een onderbouwde keuze gemaakt worden voor effectieve maatregelen.

Tot slot, is in deze laatste paragraaf een betrouwbaarheidsanalyse gegeven van de verkregen resultaten.

4.1 Werking watersysteem volgens spreadsheetmodel

In deze paragraaf wordt de werking van het watersysteem benaderd aan de hand van een spreadsheetmodel. Zie bijlage 3 voor aanvullende informatie over de achtergrond, het doel en de methodiek van het spreadsheetmodel.

Resultaten, berekend door dit model, zijn eerst geverifieerd met stijghoogte meetgegevens van DINOloket en vervolgens is een waterbalans opgesteld voor de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

4.1.1 Verificatie spreadsheetmodel aan werkelijkheid

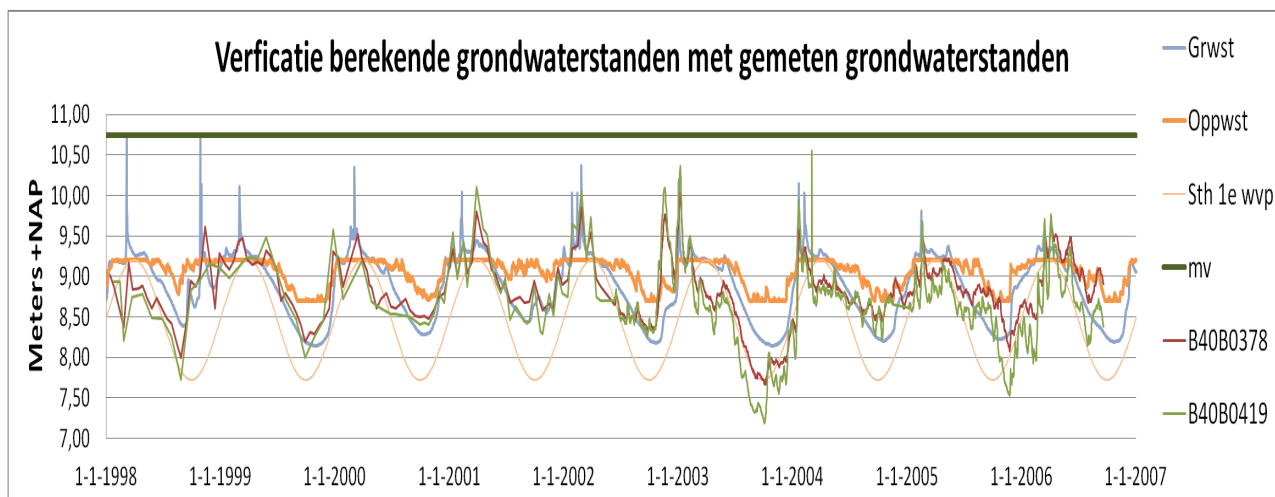
Voor de verificatie van berekende grondwaterstanden uit het spreadsheetmodel met de gemeten stijghoogtes van DINOloket is de tijdreeks 1998 - 2006 gebruikt.

Figuur 23 toont gemeten stijghoogtes uit DINOloket, de door het spreadsheetmodel berekende freatische grondwaterstand, stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, oppervlaktewaterstanden en de hoogte van het maaiveld. Voor een grotere weergave van deze grafiek, zie bijlage 5.

De curve van het oppervlaktewater (afgekort met Oppwst) heeft als randvoorwaarde dat deze nooit boven 9,20 meter + NAP en nooit onder 8,70 meter + NAP mag liggen. Dit wordt gereguleerd door middel van in- en uitlaat van water.

De curve van de berekende stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (afgekort met Sth 1^e wvp) is weergegeven als sinusgrafiek. De gemiddelde stijghoogte vormt de as van de sinus, terwijl de jaarlijks gemiddelde fluctuatie het bereik is waarmee de sinus om deze as heen draait. Deze curve is belangrijk voor het berekenen van kwel en wegzijging. Als deze curve boven de berekende grondwaterstand ligt, is er sprake van kwel en wanneer de curve onder de berekende grondwaterstand ligt, is er sprake van wegzijging (P.E. Dik, 2014).

De figuur toont daarnaast de gemeten stijghoogte curven van peilbuis B40B0378 en peilbuis B40B0419. Ten opzichte van alle andere gemeten stijghoogten in het gebied, is de gemeten stijghoogte van peilbuis B40B0378 vaak het hoogst en de gemeten stijghoogte van peilbuis B40B0419 vaak het laagst. Aangenomen wordt dat de gemeten stijghoogten van deze twee peilbuizen de extremen van het projectgebied zijn. Dit is vooral het geval in droge periodes. De berekende gemiddelde freatische grondwaterstand (afgekort met Grwst) zou dus in grote lijnen overeen moeten komen met de stijghoogte curven van beide peilbuizen. Echter, vooral in periodes met een lage gemeten stijghoogte, zakt de berekende freatische grondwaterstand minder diep uit dan de gemeten stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket.



figuur 23: Resultaten spreadsheetmodel Malburgen over de periode 1998 - 2006

tabel 3 toont de verschillen tussen de berekende en de gemeten GHG en GLG. De gemeten waarden tonen de gemiddelde GHG en GLG over de zes geselecteerde peilbuizen in het projectgebied gedurende de periode 1998 - 2006. Uit deze tabel kan worden geconcludeerd dat de berekende GHG en GLG iets hoger uitvallen dan de gemeten GHG en GLG.

Gemeten GHG 1e watervoerende pakket 1998-2006 (m+NAP)	Berekende GHG freatische grondwater 1998-2006 (m+NAP)	Gemeten GLG 1e watervoerende pakket 1998-2006(m+NAP)	Berekende GLG freatisch grondwater 1998-2006(m+NAP)
9,46	9,48	8,16	8,27

tabel 3: Berekende en gemeten GHG en GLG over de periode 1998 – 2006 in het projectgebied

Uit figuur 23 blijkt dat vooral in periodes met een lage stijghoogte, de berekende grondwaterstand minder diep uitzakt dan de gemeten stijghoogtes.

Onjuiste invoergegevens en het feit dat het freatisch grondwater wordt vergeleken met de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket, kunnen de verschillen verklaren tussen de berekende freatische grondwaterstanden en de gemeten stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket.

Daarnaast wordt de stijghoogte gemodelleerd als een vaste sinusgrafiek die elk jaar hetzelfde is. De jaarlijks minimum stijghoogte verandert dus ook niet, terwijl dit in werkelijkheid wel het geval is. Het is aannemelijk dat de sinusgrafiek in 2003 verder moet uitzakken als gevolg van droogte en lage rivierstanden. Aangezien dit niet in het model zit, kan het zijn dat de wegzijging in de droge zomer van 2003 wordt onderschat, waardoor de berekende grondwaterstand niet diep genoeg uitzakt.

Tot slot gaat het spreadsheetmodel ervan uit dat het oppervlaktewater nooit onder het minimumpeil van 8,70 meter + NAP zakt. In werkelijkheid kan het zijn dat er niet altijd water voorhanden is om het waterpeil boven het minimumpeil te houden. Hierdoor kan de grondwaterstand in werkelijkheid dieper zijn uitgezakt dan door het spreadsheetmodel wordt berekend.

4.1.2 Waterbalans droge periode

tabel 4 is een weergave van de waterbalans van Malburgen over de droge periode 29 juli 2003 tot en met 29 augustus 2003. De tabel is opgesteld aan de hand van resultaten die door het spreadsheetmodel Malburgen zijn berekend.

Volgens tabel 4 is de inlaat van water 30% van al het water wat binnenkomt gedurende deze periode. Er is geen sprake van kwel dus het overig deel van het water wat binnenkomt is neerslag.

Wat betreft de balansposten die water uit het projectgebied laten verdwijnen, zijn verdamping en wegzijging het belangrijkste. Er wordt bij de stuw van het Gelredome geen water uit het gebied gelaten en evenmin verdwijnt er water naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI).

Volgens tabel 4 verdwijnt 56% van het water door wegzijging en het overig deel verlaat het projectgebied als gevolg van verdamping.

Uit tabel 4 blijkt dat er 38 millimeter meer water uit het gebied verdwijnt dan dat er binnenkomt. Dit verschil wordt uitgedrukt in een afname van grondwater- en oppervlaktewaterberging.

Balanspost in	Hoeveelheid (mm)	Fractie (%)	Balanspost uit	Hoeveelheid (mm)	Fractie (%)
<i>Neerslag onverhard</i>	13	42	<i>Verdamping onverhard</i>	19	28
<i>Neerslag verhard</i>	7	22	<i>Verdamping verhard</i>	2	2
<i>Neerslag open water</i>	1	5	<i>Verdamping open water</i>	9	13
<i>Inlaat van water</i>	9	30	<i>Uitlaat van water</i>	0	0
<i>Kwel</i>	0	0	<i>Wegzijging</i>	38	56
			<i>RWZI</i>	0	0
Subtotaal	30	100	Subtotaal	68	100
			<i>Berging grondwater</i>	-26	
			<i>Berging oppervlaktewater</i>	-11	
Totaal	30		Totaal	31	

tabel 4: Waterbalans volgens spreadsheetmodel over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003

4.2 Werking watersysteem volgens Sobek model

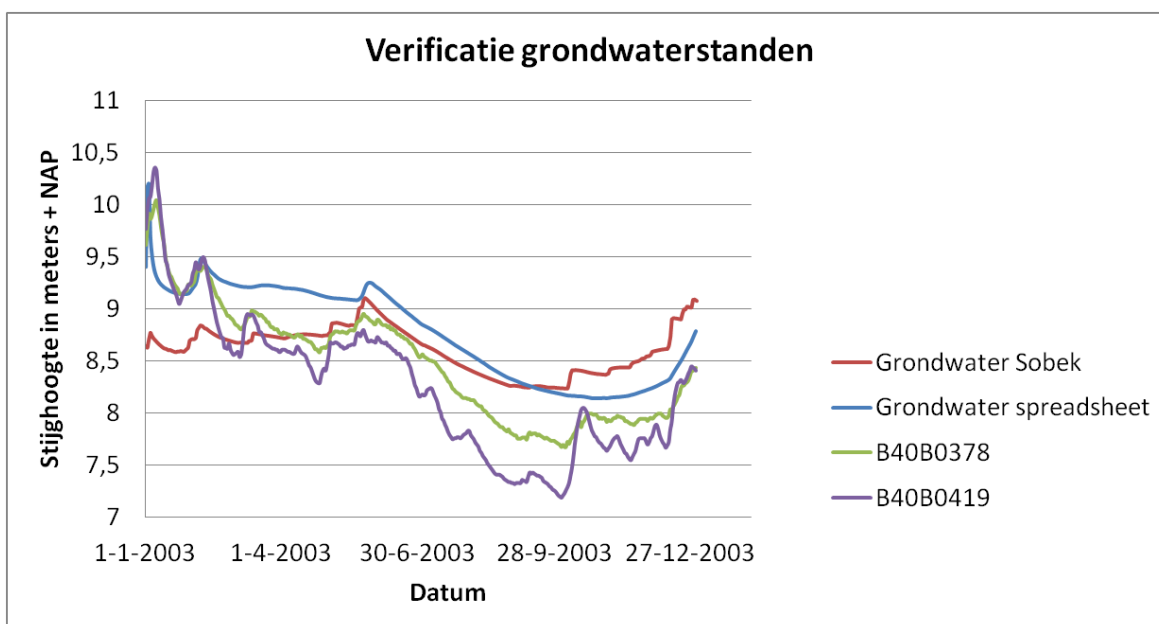
In deze paragraaf wordt de werking van watersysteem Malburgen benaderd aan de hand van een Sobek model. In bijlage 4 is aanvullende informatie gegeven over de achtergrond, het doel en de methodiek van het Sobek model. Dit model is opgebouwd door de berekende resultaten continue te verifiëren met de berekende resultaten van het spreadsheetmodel. Bovendien is met dit model een waterbalans opgesteld voor de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

4.2.1 Verificatie Sobek model met spreadsheetmodel

Het Sobek model van Malburgen is opgebouwd door de berekende grondwaterstanden en de in- en uitlaat van water in het jaar 2003 te verifiëren met het spreadsheetmodel.

In figuur 24 zijn de gemeten stijghoogtes van peilbuis B40B0378 en peilbuis B40B0419 opnieuw weergegeven, maar ditmaal over het jaar 2003. Daarbij zijn de berekende grondwaterstanden van het spreadsheetmodel en het Sobek model toegevoegd.

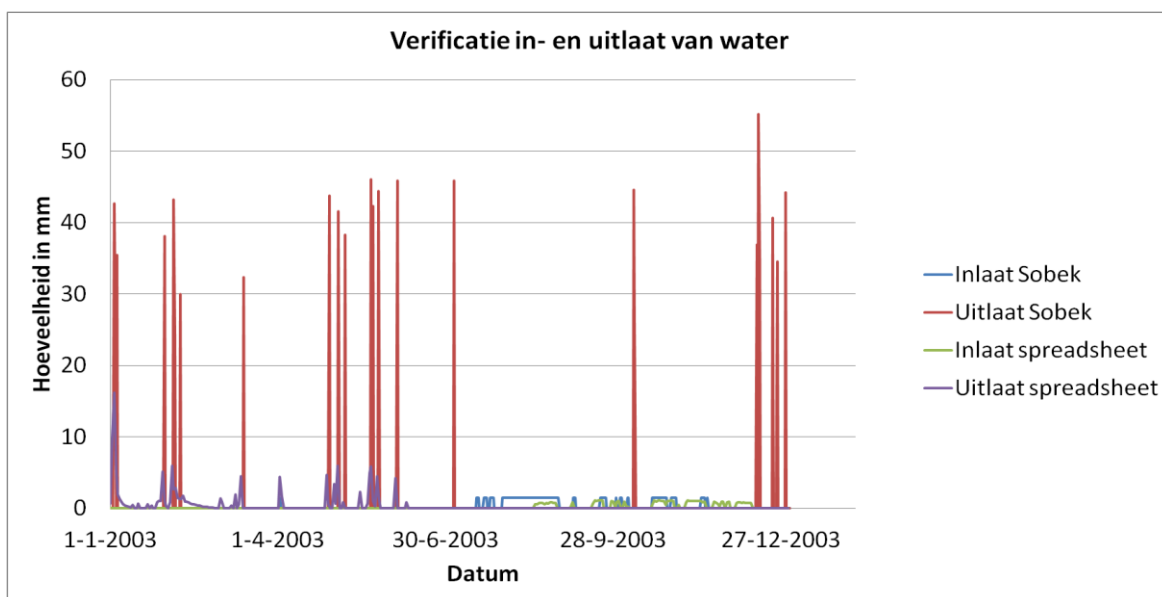
Uit dit figuur blijkt dat de grondwaterstanden, die door Sobek berekend zijn, minder goed overeenkomen met de gemeten stijghoogtes dan de berekende grondwaterstanden van het spreadsheetmodel. De jaarlijkse fluctuatie van het grondwater die door het Sobek model wordt berekend, is een stuk kleiner dan de jaarlijkse fluctuatie van het spreadsheetmodel en van de gemeten stijghoogtes. De grondwaterstanden komen redelijk met elkaar overeen in de periode waarvoor de waterbalans is opgesteld.



figuur 24: Berekende grondwaterstanden door het spreadsheet- en Sobek model in het jaar 2003

In figuur 25 zijn de in- en uitlaat van water die door het spreadsheetmodel zijn berekend, uitgezet tegen de berekende in- en uitlaat van water van het Sobek model. tabel 5 laat de totale hoeveelheid in- en uitlaat van water zien die door beide modellen voor het jaar 2003 zijn berekend.

Uit figuur 25 en tabel 5 blijkt dat de inlaat van water die door beide modellen wordt berekend redelijk met elkaar overeenkomt. Het Sobek model berekent daarentegen wel een bijna twee keer zo grote uitlaat van water dan het spreadsheetmodel.



figuur 25: Berekende in- en uitlaat van water in 2003 door het spreadsheet- en Sobek model

Inlaat van water volgens Sobek (mm)	Inlaat van water volgens spreadsheet (mm)	Uitlaat van water volgens Sobek (mm)	Uitlaat van water volgens spreadsheet (mm)
44	59	236	134

tabel 5: Berekende totale in- en uitlaat van water in 2003 door het spreadsheet- en Sobek model

De verschillen tussen de grondwaterstanden, die beide modellen berekenen, kunnen oorzaak zijn van een mindere grondwatercomponent van het Sobek model. Het Sobek model is eigenlijk bedoeld voor oppervlaktewaterberekeningen en niet voor grondwaterberekeningen. Daarnaast kan het zijn dat de inrekenperiode voor het Sobek model te kort is, waardoor de berekende grondwaterstanden geen goed beeld van de werkelijkheid geven. De keus voor de gekozen inrekenperiode is onderbouwd in de case: verificatie jaar 2003 van bijlage 4.

De grotere uitlaat van water die het Sobek model berekent ten opzichte van het spreadsheet-model, kan het gevolg zijn van het verhard oppervlak. In het spreadsheetmodel is het werkelijk totaal verhard oppervlak verminderd, omdat niet al het regenwater wat op het verhard oppervlak valt, tot afstroming komt richting het oppervlaktewater, maar toch gedeeltelijk kan infiltreren. In het Sobek model is uitgegaan van het werkelijk verhard oppervlak. In plaats van regenwater in de bodem te bergen, wordt veel regenwater direct geloosd op het oppervlakte water en zal het waterpeil relatief veel en snel stijgen. Daardoor zal er sneller, frequenter en meer water worden uitgelaten op jaarbasis. Dit beeld wordt bevestigd door figuur 25.

4.2.2 Waterbalans droge periode

tabel 6 geeft de waterbalans van Malburgen weer, zoals die is berekend door het Sobek model over de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

Volgens tabel 6 is de hoeveelheid neerslag 40% van al het water wat het projectgebied binnenkomt. Daarnaast berekent het Sobek model geen kwel en is waterinlaat dus de overige 60% van het water wat het projectgebied binnen komt.

Van de balansposten die water uit het projectgebied laten verdwijnen, zijn verdamping en wegzijging het belangrijkste. Er is geen sprake van water dat via de stuw bij het Gelredome het watersysteem verlaat. Evenmin wordt er water afgevoerd naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI). Wegzijging laat het meeste water uit Malburgen verdwijnen, namelijk 67 %. Het overig deel van het water verlaat het watersysteem als gevolg van verdamping.

Er is 5 millimeter meer water uit het systeem gelekt dan dat er is binnengekomen. Dit tekort is in berging uitgedrukt, doordat de grondwaterberging met 12 millimeter is afgenomen en de oppervlaktewaterberging met 7 millimeter is toegenomen.

Balanspost in	Hoeveelheid (mm)	Fractie (%)	Balanspost uit	Hoeveelheid (mm)	Fractie (%)
Neerslag	21	40	Verdamping	19	33
Inlaat van water	31	60	Uitlaat van water	0	0
Kwel	0	0	Wegzijging	38	67
			RWZI	0	0
Subtotaal	52	100	Subtotaal	57	100
			Berging grondwater	-12	
			Berging oppervlaktewater	7	
Totaal	52		Totaal	52	

tabel 6: waterbalans volgens Sobek model over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003

4.3 Conclusies betreffende werking watersysteem Malburgen gedurende droge periode

In deze paragraaf worden conclusies getrokken over de werking van het watersysteem op basis van de waterbalansen, die berekend zijn door het spreadsheet- en het Sobek model. Er is bepaald welke balansposten belangrijk zijn gedurende een droge periode, zodat effectieve maatregelen voor herinrichting van het watersysteem bedacht kunnen worden.

Daarnaast zijn de verschillen tussen de waterbalansen behandeld om uitspraken te kunnen doen over de betrouwbaarheid van de resultaten. In aanvulling daarop zijn meer factoren benoemd, die effect hebben op de betrouwbaarheid van de resultaten.

4.3.1 Werking watersysteem benaderd met de waterbalans

Uit de waterbalans van tabel 4 en tabel 6 blijkt dat er geen kwel optreedt gedurende de droge periode: 29 juli 2003 tot en met 29 augustus 2003.

Er komt water het systeem binnen in de vorm van neerslag en er moet water het projectgebied worden binnen gepompt door gemaal Burgemeester Matsersingel om tenminste aan het zomer streefpeil te kunnen voldoen.

Gedurende de droge periode laat de stuw bij het Gelredome geen water uit Malburgen stromen. Daarnaast gaat er ook geen water naar de rioolwaterzuiveringinstallatie (RWZI).

Wegzijging is de belangrijkste oorzaak voor het verdwijnen van water uit Malburgen. Deze factor maakt het gebied dus heel kwetsbaar voor waterverliezen gedurende droge periodes. Dit wordt veroorzaakt door de drainerende Nederrijn en door de zandige bodemopbouw van het projectgebied.

Daarnaast speelt ook verdamping een belangrijke rol in het leeglopen van het watersysteem gedurende een droge periode. De meeste verdamping is afkomstig van het onverharde oppervlak en het oppervlak open water.

De totale hoeveelheid geborgen grondwater neemt sterk af in de droge periode, wat zichtbaar is in een sterke daling van de grondwaterstand.

De oppervlaktewaterberging verandert in mindere mate, doordat het watersysteem minimaal op zomer streefpeil wordt gehouden door de inlaat van water. Daarnaast is er op 29 augustus 2003 een flinke bui gevallen. Het regenwater dat op het verharde oppervlak valt, stroomt diezelfde dag nog naar het oppervlakte water, waardoor de oppervlaktewaterberging nog aangevuld wordt binnen de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003. Het regenwater wat op het onverharde oppervlak valt, heeft meer tijd nodig om het grondwater te bereiken, daarom neemt de grondwaterberging niet meer toe in deze periode. Dit kan de verschillen verklaren tussen de grondwater- en oppervlaktewaterberging.

4.3.2 Betrouwbaarheidsanalyse

In deze paragraaf wordt de betrouwbaarheid van de modellen geanalyseerd. Daarvoor worden de berekende waterbalansen van beide modellen met elkaar vergeleken. Bovendien worden enkele uitspraken gedaan over factoren die de betrouwbaarheid van de modellen mogelijk doet beïnvloeden.

4.3.2.1 Verschil tussen beide waterbalansen

In de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 is volgens het spreadsheetmodel 9 millimeter water binnengelaten. Dit is 30% van de totale hoeveelheid binnengekomen water dat door het spreadsheetmodel is berekend. Volgens het Sobek model is er maar liefst 31 millimeter water binnengelaten in diezelfde periode. Dit is 60% van de totale hoeveelheid binnengekomen water dat door het Sobek model is berekend.

Daarnaast berekent het spreadsheetmodel 30 millimeter verdamping. Dit is 44% van al het water dat het spreadsheetmodel uit het projectgebied laat gaan. Het Sobek model berekent voor verdamping 19 millimeter water. Dit is 33% van al het water dat het watersysteem verlaat volgens het Sobek model.

Er zit ook significant verschil in de afname grondwaterberging die door beide modellen wordt berekend. In het spreadsheetmodel is dit 26 millimeter, terwijl het Sobek model de grondwaterberging met 12 millimeter laat afnemen.

Opvallend is ook de berging oppervlaktewater, welke in het Sobek model met 7 millimeter is toegenomen, terwijl deze in het spreadsheetmodel met 11 millimeter is afgenomen.

De verschillen tussen de resultaten kunnen worden veroorzaakt, doordat beide modellen rekenen met verschillende percentages oppervlak verhard, onverhard en open water. Het Sobek model rekent ten opzichte van het spreadsheetmodel met een kleiner percentage oppervlak open water en onverhard, maar met een groter percentage oppervlak verhard. Het percentage oppervlak open water is in het Sobek model kleiner omdat er geen rekening gehouden wordt met de waterplas Eimersweide, aangezien deze niet in verbinding staat met de watergangen. Het percentage verhard oppervlak is in het Sobek model groter, omdat in dit model het werkelijk verhard oppervlak wordt benaderd. In het spreadsheetmodel is gekozen voor een kleiner percentage verhard oppervlak dan dat deze in werkelijkheid is. Deze keus is onderbouwd in bijlage 3.

Als gevolg van het kleinere percentage oppervlak open water en onverhard, heeft het Sobek model waarschijnlijk minder verdamping berekend dan het spreadsheetmodel. Daarnaast zal het grotere percentage oppervlak verhard leiden tot een gevoeliger oppervlaktewatersysteem, omdat vrijwel al het verhard oppervlak is afgekoppeld op het open water. De oppervlaktewaterstand stijgt in het Sobek model sneller en meer als gevolg van een bui, dan in het spreadsheetmodel. De bui die 16,8 millimeter regenwater achterliet op 29 augustus 2003 heeft waarschijnlijk meer en sneller effect op het oppervlaktewater van het Sobek model dan op het oppervlaktewater van het spreadsheetmodel. Dit kan verklaren dat de oppervlaktewaterberging in het Sobek model aan het eind van de periode is toegenomen, terwijl deze in het spreadsheetmodel juist is afgenomen.

In het Sobek model zal het grondwatersysteem juist minder water ontvangen, door een kleiner percentage oppervlak onverhard. Als gevolg daarvan zal de buffer grondwater in het spreadsheetmodel groter zijn. Voor het spreadsheetmodel betekent dit dat in droge periodes het oppervlaktewater nog kan worden aangevuld door het grondwater. In het Sobek model is de grondwaterbuffer kleiner en zal de watergang ook minder aangevuld kunnen worden door grondwater en dus sneller leeglopen. Het Sobek model zal vervolgens eerder starten met het inlaten van water dan het spreadsheetmodel. Dit beeld wordt bevestigd door figuur 25.

Er dient nog vermeld te worden dat de berekende hoeveelheid wegzijging van het spreadsheetmodel is ingevoerd in het Sobek model. Dit verklaart dat er geen verschil in wegzijging zit tussen beide waterbalansen.

4.3.2.2 Betrouwbaarheid van beide modellen

Er kan aan de hand van de berekende resultaten niet direct worden geconcludeerd welk model betrouwbaarder is. Door de verschillen in de waterbalansen van beide modellen, kan wel geconstateerd worden dat met enige voorzichtigheid moet worden omgesprongen met de berekende waarden.

De betrouwbaarheid van de berekende resultaten wordt ook nadelig beïnvloed door het ontbreken van voldoende meetgegevens van het oppervlaktewater om de modellen te kunnen kalibreren.

Bovendien wordt in beide modellen een efficiënte in- en uitlaat van water benaderd. Het is aannemelijk dat de berekende in- en uitlaat van water een onderschatting van de werkelijkheid is.

Daarnaast, bevindt het projectgebied zich direct naast de Nederrijn. De waterstanden in de Nederrijn zijn van invloed op de grondwater- en oppervlaktewaterstanden in het projectgebied. In beide modellen is het effect van de rivier benaderd door per dag een gemiddelde kwel en wegzijging te berekenen voor het hele projectgebied. In werkelijkheid kunnen kwel en wegzijging erg verschillen per locatie in het projectgebied. Daarnaast is het aannemelijk dat de modellen minder kwel en wegzijging berekenen dan dat er in werkelijkheid optreedt.

Kortom, de resultaten die berekend zijn moeten niet direct worden aangenomen als de werkelijkheid. Er is wel een inschatting gemaakt van de werking van het watersysteem gedurende een droge periode.

5 Gewenste situatie watersysteem Malburgen

Nu de huidige werking van het watersysteem Malburgen is geanalyseerd, kan een gewenste situatie worden geschetst. Dit is gedaan door het opstellen van doelstellingen, eisen en criteria.

5.1 Doelstellingen

Er wordt gestreefd naar een duurzaam en robuust watersysteem Malburgen. In deze paragraaf wordt uitgewerkt wat er onder duurzaam en robuust wordt verstaan.

5.1.1 Duurzaam

Met duurzaam wordt bedoeld dat het watersysteem van Malburgen is ingericht voor het nu en later. Er wordt gestreefd naar een watersysteem waarin problemen opgelost kunnen worden met (hulp)bronnen in het gebied zelf. Daarbij mogen negatieve effecten van het watersysteem niet worden afgewenteld op andere gebieden of de kop opsteken in de toekomst. Bovendien zijn er meerdere belangen in acht genomen bij het inrichten van het watersysteem, om voldoende draagkracht voor het watersysteem te creëren (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.1.2 Robuust

Robuust houdt in dat het watersysteem af moeten zijn gestemd op de natuurlijke dynamiek van het watersysteem. Dit betekent dat het watersysteem bestand moet zijn tegen veranderingen in bijvoorbeeld de waterstand, waterkwaliteit en/of wateropslag (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.2 Eisen

In deze paragraaf worden de wettelijke eisen van het waterschap opgesomd die van toepassing zijn op watersysteem Malburgen.

5.2.1 Maximum oppervlakte waterpeil

Een bui die eens in de tien jaar voorkomt met 10% opslag vanwege klimaatsverandering, wordt gedefinieerd als een bui $T = 10 + 10\%$. In stedelijk gebied mag bij een soortgelijke bui het waterpeil in de watergang maximaal 0,30 meter stijgen (Waterschap Rivierenland, z.d.^d).

Een bui die eens in de honderd jaar voorkomt met 10% opslag vanwege klimaatsverandering, wordt gedefinieerd als een bui $T = 100 + 10\%$. Voor stedelijk gebied geldt dat deze bui niet mag leiden tot een waterstand hoger dan het maaiveldniveau (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.2.2 Waterberging

Wijzigingen in het dwarsprofiel van oppervlaktewaterlichamen kunnen invloed hebben op de berging. De berging is de hoeveelheid kubieke meters water die in het oppervlakte waterlichaam verzameld kan worden boven het zomerpeil. Compensatie is verplicht als de waterberging afneemt door veranderingen in het profiel. Deze compensatie moet in hetzelfde peilgebied, zo dicht mogelijk bij het veranderde profiel, worden gerealiseerd (Waterschap Rivierenland, 2014).

5.2.3 Dimensies A-watergang

Voor het dwarsprofiel van hoofdwatgangen, gedefinieerd als A-watgangen, geldt dat het talud niet schuiner mag zijn dan 1:2. Daarnaast is de minimum bodembreedte van een watergang 0,70 meter (Waterschap Rivierenland, 2006).

5.2.4 Grondwater

Toename van grondwateroverlast of kwel ten opzichte van de bestaande situatie, als gevolg van ruimtelijke ontwikkelingen, is niet toegestaan (Waterschap Rivierenland, z.d.^e).

5.2.5 Kwaliteit oppervlaktewater

Het stedelijk oppervlakte water moet van een goede chemische kwaliteit zijn. Dit is vastgelegd in de Europese Kaderrichtlijn Water (Waterschap Rivierenland, 2009).

Daarnaast moet ook de ecologische kwaliteit voldoende zijn, wat inhoudt dat de parameters moeten voldoen aan het Maximaal Toelaatbaar Risico. Parameters voor ecologische kwaliteit zijn doorzicht, thermische omstandigheden, zuurstofhuishouding en nutriënten (Stowa, 2007). Het oppervlakte water moet daarnaast voldoen aan de norm biologisch gezond van Stowa klasse 3 (Waterschap Rivierenland, 2009).

Tot slot moeten overige verontreinigende stoffen voldoen aan de normen van het Besluit Kwaliteitseisen en Monitoring Water 2009 (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.2.6 *Kwaliteit grondwater*

In de intrekzone van drinkwaterwinning Simons (zie figuur 18) zijn veranderingen, die een negatief effect hebben op de kwaliteit van het grondwater, niet toegestaan (Gemeente Arnhem, 2007^a).

5.3 **Criteria**

In deze paragraaf worden criteria geformuleerd die door de auteur van dit rapport als belangrijk worden ervaren.

5.3.1 *Effectief*

Effectief houdt in dat het watersysteem doeltreffend is. In dit geval betekent dit dat met minimaal gebruik van water toch wordt voldaan aan de doelstellingen, eisen en criteria.

5.3.2 *Minimum waterdiepte*

Het waterschap Rivierenland heeft vastgesteld dat de bodemhoogte van een A-watgang 1 meter onder het zomerpeil moet liggen (Waterschap Rivierenland, 2006). Dit impliceert dat de waterdiepte vrijwel nooit minder dan 1 meter mag zijn. Echter, er worden soms afwijkende bodemhoogtes en daarmee ook afwijkende waterdieptes voorgeschreven in gebieden die bijvoorbeeld sterk onderhevig zijn aan rivierkwel (Waterschap Rivierenland, 2006).

Aangezien Malburgen onderhevig is aan kwel en wegzijging, wordt daarom als criterium vastgesteld dat er nergens droogval van een watgang mag optreden gedurende een droogte T=10. Op deze manier blijft een relatief goede beeldkwaliteit gewaarborgd en blijft stank beperkt.

5.3.3 *In- en uitlaat van water*

Een criterium voor het watersysteem is dat de externe wateraanvoer moet afnemen ten opzichte van de huidige situatie gedurende een droogte T = 10.

Daarnaast moet de uitlaat van water gelijk blijven of worden verminderd ten opzichte van huidige situatie gedurende een droogte T = 10.

5.3.4 *Grondwater*

Uitgangspunt voor stedelijk herinrichting is dat deze grondwaterneutraal wordt ingepast in het projectgebied. Dit houdt in dat er in zowel het projectgebied als in de omgeving geen wijzigingen mogen plaatsvinden in de grondwaterstanden en –stromen ten opzichte van de huidige situatie (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.3.5 *Ruimte*

Door de hoge grondprijs en de beperkte ruimte is een groot oppervlak van het stedelijk gebied al in gebruik. Het watersysteem mag niet meer ruimte in gebruik nemen dan dat deze nu al doet. Onderhoud aan het watersysteem, bijvoorbeeld baggeren en maaien, moet daarnaast mogelijk blijven (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.3.6 *Landschap, natuur en cultuurhistorie*

Landschappelijke, natuur- en cultuurhistorische waarden moeten worden behouden en, indien mogelijk, worden versterkt (Waterschap Rivierenland, 2009).

5.3.7 *Zetting*

Er mag niet tot nauwelijks zetting optreden in het watersysteem als gevolg van de maatregelen. Op deze manier wordt schade aan bebouwing voorkomen.

6 Maatregelen voor een duurzamer en klimaatrobuuster watersysteem Malburgen

In dit hoofdstuk zijn maatregelen geopperd die kunnen helpen om droogtes beter op te vangen. Er is een selectie gemaakt van geschikte maatregelen die het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk kunnen maken van externe wateraanvoer. Bovendien zijn de kansen en potentiële knelpunten van de maatregelen beschreven.

6.1 Geëlimineerde maatregelen

Het afkoppelen van regenwater, dempen van watergangen, 'waterdicht' maken van watergangen en het verminderen van de hoeveelheid wateronttrekking door drinkwaterwinning Sijmons zijn geëlimineerde maatregelen om Malburgen minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer. De maatregelen zijn door de auteur van deze rapportage geëlimineerd op grond van onderstaande redenen.

Afkoppeling van regenwater betekent dat minder regenwater naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie gaat en meer regenwater in het watersysteem van Malburgen blijft. Op deze manier is waarschijnlijk minder externe wateraanvoer nodig om het gebied op peil te houden.

De afkoppelkansen in Malburgen zijn echter minimaal, omdat bijna al het regenwater al wordt afgekoppeld op het oppervlaktewater, zie paragraaf 3.5.3.3. Deze maatregel is daarom geëlimineerd.

Dempen van watergangen betekent dat er minder volume water nodig is om het gebied op peil te houden, aangezien de berging in het gebied is afgenomen. Mogelijk resulteert dit in vermindering van externe wateraanvoer, al dient te worden opgemerkt dat de verminderde berging ook leidt tot een kleinere buffer water voor droge perioden.

Uit paragraaf 5.2.2 blijkt dat compensatie nodig is voor verminderde berging, waardoor er nog steeds evenveel water nodig is om het projectgebied op peil te houden. De externe wateraanvoer wordt niet verminderd en de maatregel wordt daarom geëlimineerd.

De watergangen kunnen 'waterdicht' gemaakt worden met klei, zodat waterverliezen door wegzijging worden beperkt. Dit kan de externe wateraanvoer verminderen.

Door gebrek aan klei in het projectgebied, zal er veel klei uit andere gebieden moeten worden gehaald voor het waterdicht maken van de watergangen. Dit is een dure oplossing en wordt daarom geëlimineerd.

De hoeveelheid grondwater, wat onttrokken wordt door drinkwaterwinning Sijmons, kan worden verminderd. Grondwaterstanden zullen als gevolg hoger gaan staan en daarom zal het oppervlaktewater minder snel infiltreren om het grondwater aan te vullen.

Drinkwaterwinning Sijmons is echter uitgegroeid tot een belangrijke schakel in het netwerk van drinkwaterwinningen in Gelderland (Gemeente Arnhem, 2009). Het is financieel en maatschappelijk een dure oplossing om het wateronttrekking regime te verminderen of zelfs stop te zetten. Deze maatregel wordt daarom ook geëlimineerd.

6.2 Geselecteerde maatregelen

Op basis van de analyse van watersysteem Malburgen en op basis van de geformuleerde doelstellingen, eisen en criteria zijn het verlagen van het minimum oppervlaktewaterpeil en het toepassen van een accoladeprofiel wel als geschikte maatregelen aangemerkt om het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer.

6.2.1 *Verlaging minimum oppervlaktewaterpeil*

Het is gebleken dat wegzijging een grote uitlaatpost is gedurende droge periodes. Het kost relatief gezien erg veel water om deze verliezen te compenseren, aangezien veel water direct weer verdwijnt door de zandige bodemopbouw en de lage rivierstanden in de Nederrijn. Om deze verliezen te beperken, is het belangrijk om in te spelen op wegzijging door het oppervlaktewaterpeil verder te laten uitzakken.

Uit figuur 19 wordt duidelijk dat er twee zomer streefpeilen voor het projectgebied van toepassing zijn, namelijk 8,70 meter + NAP en 8,85 meter + NAP. Om het watersysteem duurzamer en robuuster te maken kan gekozen worden voor een verlaging van het minimum oppervlaktewaterpeil (hierna te noemen: verlaging minimumpeil) met tien of twintig centimeter. Op deze manier hoeft minder water het gebied worden binnengelaten om het minimum oppervlaktewaterpeil te kunnen hanteren.

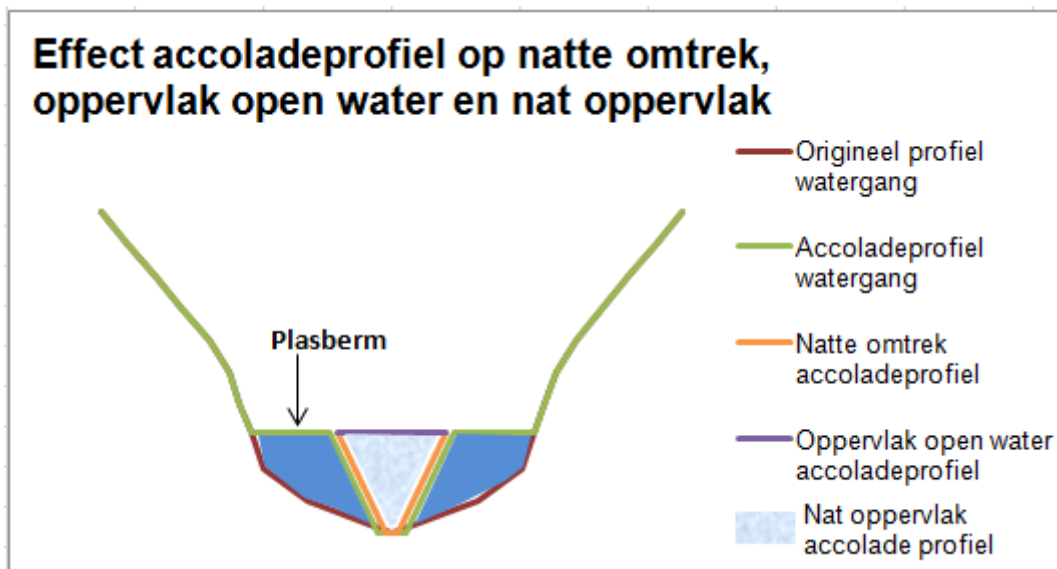
De maatregel kan geïmplementeerd worden door de stuwhoogtes gelijk aan of iets lager in te stellen dan het nieuwe minimumpeil. Op deze manier kan effectief water het projectgebied worden binnengepompt, aangezien de waterstand in het hele projectgebied gelijk is. De pompcapaciteit van het gemaal kan zo worden ingesteld dat het waterpeil nergens onder het minimumpeil zakt.

6.2.2 Toepassen accoladeprofiel

Uit de waterbalansen is naar voren gekomen dat wegzijging en verdamping veel water uit het projectgebied laten verdwijnen. Door een kleinere natte omtrek van de watergang kunnen waterverliezen door wegzijging worden beperkt. Waterverliezen door verdamping kunnen worden verminderd door een kleiner oppervlak open water.

Een accoladeprofiel in de watergang kan verdamping en wegzijging verminderen. In figuur 26 is door middel van Excel een schematisering gemaakt van het accoladeprofiel. Uit dit figuur blijkt dat als het oppervlaktewaterpeil onder de plasberm zakt, de natte omtrek en het oppervlak openwater sterk afnemen ten opzichte van het originele profiel. Hierdoor nemen de waterverliezen als gevolg van verdamping en wegzijging ook af. Daarnaast is met een accoladeprofiel een kleiner volume water nodig om een peil te hanteren dat lager is dan de plasberm. Uit figuur 26 blijkt dat in het originele profiel zowel het lichtblauwe als het donkerblauwe nat oppervlak nodig is voor een oppervlaktewaterpeil dat net onder de hoogte van de plasberm ligt. In het accoladeprofiel is voor hetzelfde peil alleen het lichtblauwe nat oppervlak nodig.

Een accoladeprofiel kan geïmplementeerd worden door watergangen een smalle basis te geven beneden de plasberm en boven de plasberm de watergang het oorspronkelijke profiel te laten volgen. De dimensies van het accoladeprofiel staan beschreven in paragraaf 6.4.3.



figuur 26: Effect van het accoladeprofiel op natte omtrek, oppervlak open water en nat oppervlak van de watergang

6.2.3 Toepassen accoladeprofiel in combinatie met verlaging minimumpeil

Er kan ook gekozen worden voor een combinatie van het accoladeprofiel met een verlaging van het minimumpeil. Deze maatregel zal waarschijnlijk de meeste impact op het watersysteem hebben, maar lijkt, gezien de positieve effecten van de andere geselecteerde maatregelen, vooral ook bij te dragen aan een duurzamer en robuuster watersysteem van Malburgen.

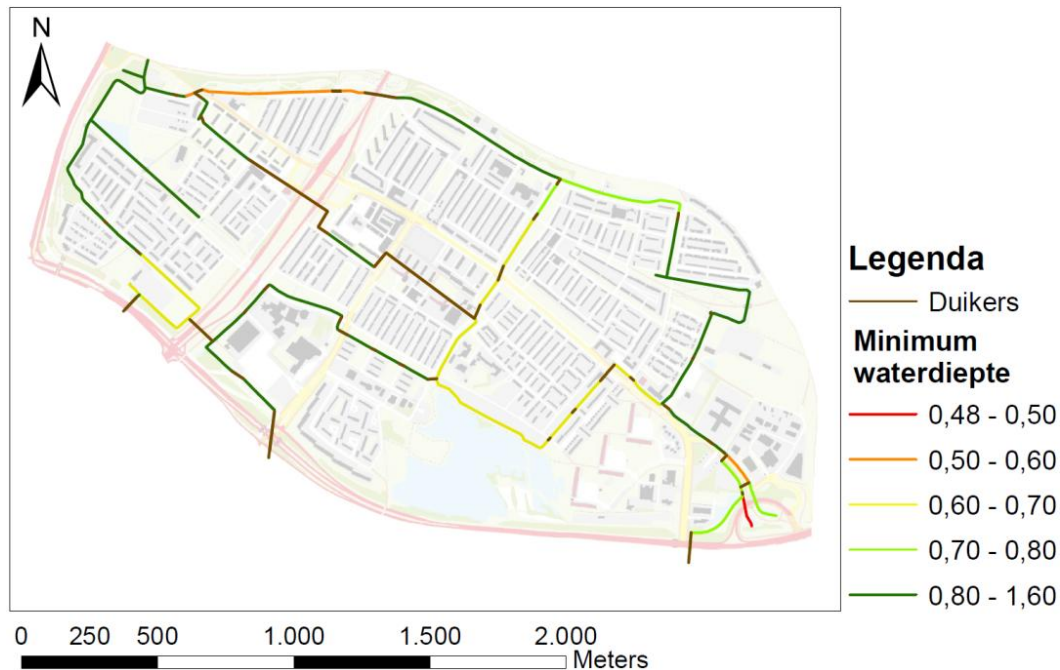
6.3 Kansen voor verlaging minimumpeil

De kansen voor deze maatregel zijn benoemd door aan te geven welke locaties geschikt zijn voor de implementatie en door de doelstellingen, eisen en criteria aan te halen waarop de maatregel goed aansluit.

6.3.1 Geschikte locatie om maatregel te implementeren

In figuur 27 is de minimum waterdiepte weergegeven tijdens de droogte $T = 10$ in 2003. De minimum waterstanden zijn door Sobek berekend met als randvoorwaarde dat de waterstand nergens lager is dan 8,70 meter + NAP. Het betreft hier het referentiescenario, zoals beschreven staat in bijlage 4. De kleinste waterdiepte is 0,48 meter, wat betekent dat een verlaging van 10 of 20 centimeter nergens leidt tot droogval van de watergang.

De verlaging van het minimumpeil met 10 of 20 centimeter kan dus in het hele projectgebied geïmplementeerd worden.



figuur 27: Minimum waterdiepte tijdens een droogte $T = 10$

6.3.2 Doelstellingen

De maatregel draagt bij aan een duurzamer watersysteem Malburgen. Wanneer deze maatregel wordt uitgevoerd, ontstaat een watersysteem dat droogtes nog goed kan opvangen in het nu en later. De omgeving verliest minder water aan Malburgen en Malburgen zelf maakt meer gebruik van kwalitatief goed gebiedseigen water. De negatieve effecten van dit watersysteem zijn beperkt, aangezien het water alleen in erg droge periodes voor langere tijd uitzaakt tot onder de 8,70 meter + NAP. Door de positieve effecten is het aannemelijk dat er draagkracht is voor dit watersysteem.

Daarnaast wordt het watersysteem klimaatrobuuster als gevolg van deze maatregel. Door de grotere bandbreedte, waarin het oppervlaktewaterpeil mag fluctueren, kan er flexibeler worden meebewogen op de natuurlijke dynamiek. Bovendien is het gebied minder afhankelijk van externe wateraanvoer, waardoor het watersysteem uit zichzelf beter kan omgaan met droogtes.

6.3.3 Eisen

Wat betreft hoogwater, zou een verlaging van het minimumpeil in principe niet kunnen leiden tot hogere waterstanden gedurende een bui $T = 10 + 10\%$ of een bui $T = 100 + 10\%$. Immers, de waterberging in de watergangen wordt niet verminderd. In hoofdstuk 7 wordt deze maatregel getoetst aan de normen van beide buien door middel van het Sobek model.

Daarnaast leidt deze maatregel ook niet tot een ander dwarsprofiel van de watergang of tot een toename van grondwateroverlast of kwel.

6.3.4 Criteria

De maatregel zal het watersysteem effectiever laten omgaan met water, aangezien verwacht wordt dat lekverliezen worden verminderd.

Zoals beschreven staat in paragraaf 6.3.1 resulteert de maatregel nergens tot droogval van de watergang.

Het is daarnaast zeer aannemelijk dat water in- en uitlaat gedurende een droogte $T=10$ wordt verminderd of gelijk blijft. In hoofdstuk 7 zal blijken wat het effect is van de maatregel op de in- en uitlaat van water gedurende een bepaalde periode in een droogte $T=10$.

Daarnaast zal de maatregel geen effect hebben op de ruimte in het projectgebied.

Binnen het projectgebied zijn geen Natura2000 gebieden of nationale landschappen aanwezig. Er wordt aangenomen dat de maatregel geen effect heeft op nabijgelegen Natura2000 gebieden of nationale landschappen.

Er wordt verwacht dat er beperkt zetting in het gebied zal optreden als gevolg van de maatregel. De deklaag van klei is namelijk in het overgrote deel van het gebied slechts 2 meter dik en is daarmee relatief dun. Er wordt aangenomen dat sterke fluctuaties in het grondwater de deklaag al vrijwel geheel hebben doen laten inklinken. Meer significante bodemdaling is niet waarschijnlijk. De droogteschade als gevolg van een uitzakkend waterpeil zal daarom ook beperkt blijven.

6.4 Kansen voor accoladeprofiel

De kansen voor deze maatregel zijn ook benoemd door geschikte locaties voor de implementatie te markeren en door de doelstellingen, eisen en criteria aan te halen waarop de maatregel goed aansluit.

6.4.1 Geschikte locatie om maatregel te implementeren

Het accoladeprofiel kan worden toegepast in de watergangen die het meest gevoelig zijn voor wegzijging. Uit figuur 17 blijkt dat voor de watergangen in het centrale deel van Malburgen de grootste wegzijging wordt berekend gedurende de droge zomer van 2003. Dit beeld wordt ook bevestigd door DINOloket, aangezien er een relatieve dunne holocene deklaag voor dit deel van het projectgebied wordt geschetst. Voornamelijk de kwelsloot heeft op sommige locaties een erg dunne holocene deklaag van minder dan een halve meter (DINOloket, z.d.).

Daarnaast wordt verwacht dat de maatregel effectief werkt op brede watergangen, aangezien de natte omtrek van deze watergangen het meest gereduceerd wordt in een droge periode. Bovendien is er gekozen voor een efficiënte aanpak door lange stukken watergang te selecteren voor het accoladeprofiel.

Op basis van deze criteria zijn een aantal watergangen geselecteerd voor het accoladeprofiel, zie daarvoor figuur 28.



figuur 28: Watergangen die in aanmerking komen voor accoladeprofiel

6.4.2 Doelstellingen

Het toepassen van een accoladeprofiel draagt bij aan een duurzamer watersysteem Malburgen. Toepassing van deze maatregel creëert een watersysteem dat droge periodes in het nu en later nog goed kan opvangen. Het gebiedseigen water, wat van goede kwaliteit is, wordt minder vermengd met gebiedsvreemd water wat van minder goede kwaliteit is. Dit is gunstig voor de waterkwaliteit in Malburgen. De omgeving wordt ook positief beïnvloed, doordat het minder water verliest aan de wijk Malburgen. Daarnaast lijkt er draagkracht voor dit watersysteem te kunnen worden gecreëerd, door de voordelen die het biedt.

De maatregel maakt het watersysteem ook klimaatrobuuster, omdat er minder water nodig is om het minimumpeil te kunnen hanteren. Droogtes kunnen hierdoor beter het hoofd worden geboden.

6.4.3 Eisen

Er wordt aangenomen dat, ten opzichte van het referentie scenario, deze maatregel niet leidt tot een hoger maximumpeil gedurende een bui $T = 10 + 10\%$ of een bui $T = 100 + 10\%$. Dit omdat de berging van de watergang boven het zomer streefpeil niet mag worden verminderd. Daarom is de plasberm op de hoogte van het zomer streefpeil gedimensioneerd. De berging van de watergang beneden de hoogte van de plasberm wordt verminderd, terwijl de berging van de watergang boven de plasberm gelijk is aan de huidige situatie. Er wordt in dit onderzoek aangenomen dat het initieel waterpeil voor de bui altijd boven het zomer streefpeil zal liggen. Daarom zal het oppervlaktewaterpeil niet anders reageren op de buien dan dat het doet in het referentie scenario. Het watersysteem met accoladeprofielen is in hoofdstuk 7 getoetst aan de normen voor een bui $T = 10 + 10\%$ en een bui $T = 100 + 10\%$.

De dimensies van het dwarsprofiel zullen overeenkomen met de minimumeisen van het waterschap Rivierenland, omdat wordt aangenomen dat op deze manier de inlaat van water het meest wordt verminderd. Dit houdt in dat het accoladeprofiel taluds heeft met een schuinite 1:2 en dat de waterbodem een breedte heeft van 70 centimeter. Voor de exacte afmetingen van de accoladeprofielen zie bijlage 4.

De watergang zal op dezelfde diepte blijven liggen, om zo te voorkomen dat grondwateroverlast of kwel toeneemt in het gebied.

6.4.4 Criteria

Aangezien het minimum waterpeil bij deze maatregel gelijk blijft aan het huidige zomer streefpeil, zal aan het criterium van de minimum waterdiepte worden voldaan.

Verwacht wordt dat de inlaat van water wordt verminderd als gevolg van de maatregel, omdat het watersysteem minder water kan bergen. Het is aannemelijk dat daardoor de waterstand over het algemeen hoger staat dan in het referentie scenario en dat het gemaal daarom pas later water het gebied hoeft in te brengen om het zomer streefpeil te kunnen blijven hanteren. In hoofdstuk 7 wordt onderzocht in hoeverre de inlaat van water wordt verminderd gedurende een bepaalde periode in een droogte $T = 10$.

Er wordt aangenomen dat deze maatregel grondwaterneutraal kan worden ingepast. De totale berging in de watergang wordt aangepast, maar de oppervlaktewaterpeilen veranderen niet. Verwacht wordt dat de grondwaterstanden daarom ook gelijk blijven aan de huidige situatie. Het implementeren van deze maatregel leidt niet tot verlies van ruimte. Op sommige locaties wordt de berging onder het zomer streefpeil verminderd, maar daarvoor hoeft geen extra berging gegraven worden.

Er wordt aangenomen dat Natura2000 gebieden en nationale landschappen niet leiden onder deze maatregel, aangezien deze niet in het projectgebied aanwezig zijn. Er wordt niet verwacht dat de maatregel zoveel impact heeft dat naburige Natura2000 gebieden of nationale landschappen eronder te lijden hebben.

Tot slot zal deze maatregel waarschijnlijk geen invloed uitoefenen op zetting in het gebied, aangezien het oppervlaktewaterpeil en de grondwaterstand niet worden verlaagd.

6.5 Kansen voor verlaging minimumpeil en toepassing accoladeprofiel

Uit de voorgaande twee paragrafen is gebleken dat er kansen zijn voor het implementeren van zowel een minimum peilverlaging als een accoladeprofiel. Op basis van deze informatie kan geconstateerd worden dat er ook kansen zijn voor het combineren van een minimum peilverlaging met de toepassing van accoladeprofielen in watergangen.

In dit scenario wordt ook beter gebruik gemaakt van het accoladeprofiel. De plasberm van het accoladeprofiel is in dit scenario namelijk nog steeds op de hoogte van het zomer streefpeil gedimensioneerd. Aangezien het oppervlaktewaterpeil nu dieper mag uitzakken dan het zomer streefpeil, zakt het water in droge perioden onder de hoogte van de plasberm. Door de verkleinde berging onder de plasberm is er ten opzichte van het referentie scenario nu minder water nodig om het minimumpeil te kunnen hanteren.

De verlaging van het minimumpeil kan in het hele projectgebied worden toegepast en de accoladeprofielen kunnen worden gerealiseerd op de locaties van figuur 28.

6.6 Potentiële knelpunten als gevolg van de maatregelen

De potentiële knelpunten zijn de doelstellingen, eisen en criteria waaraan het watersysteem niet voldoet als gevolg van een bepaalde maatregel.

6.6.1 *Potentiële knelpunten als gevolg van verlaging minimumpeil*

Verdroging en oxidatie zijn potentiële knelpunten van het watersysteem als het minimumpeil wordt verlaagd. Dieper uitzakkende oppervlaktewaterpeilen kunnen leiden tot lagere grondwaterstanden, wat op haar beurt weer kan leiden tot verdroging van vegetatie of oxidatie in cultuurhistorische elementen.

Eimersweide is onderdeel van de Ecologische Hoofdstructuur (Synbiosys, 2007) en de huidige Malburgse bandijk behoort tot een cultuurhistorisch element (PDOK cultuurhistorisch GIS, 2012). Bovendien liggen in Malburgen op diverse plaatsen sportvelden, waaronder de Bakenhof. Deze locaties kunnen negatieve gevolgen ondervinden van de verlaging van het minimumpeil.

Verder kan het zuurstofgehalte in het water sterk dalen als er minder water hoeft worden aangevoerd om aan het verlaagde minimumpeil te kunnen voldoen. Door een kleiner volume water in de watergangen gedurende een droge periode, wordt het water sneller opgewarmd. Het warmere water kan minder zuurstof bevatten en laat de zuurstofconcentratie in de waterlaag dalen. Bovendien wordt de afname van zuurstofconcentratie versterkt door verminderde waterdynamiek en de verhoogde microbiële activiteit tijdens de zomermaanden (F. Smolders, J. Loermans & I. Lamers, 2012).

6.6.2 *Potentiële knelpunten als gevolg van accoladeprofiel*

Wat betreft het accoladeprofiel, kan deze maatregel resulteren in een watersysteem dat frequenter, sneller en meer water moeten uitlaten op jaarbasis. Het is aannemelijk dat een verminderde totale berging, leidt tot een hogere gemiddelde waterstand. Hierdoor wordt sneller het maximum streefpeil bereikt en gaat het watersysteem dus frequenter, sneller en meer water uitlaten.

Daar staat tegenover dat het accoladeprofiel mogelijk leidt tot minder aantrekking van kwel.

6.6.3 *Potentiële knelpunten als gevolg van verlaging minimumpeil en toepassing accoladeprofiel*

Een combinatie van het accoladeprofiel met het verlagen van het minimum waterpeil kan leiden tot verdroging, oxidatie en een afname van de zuurstofconcentratie in het oppervlaktewater. De jaarlijkse uitlaat van water wordt niet per se verhoogd in dit scenario. Het accoladeprofiel kan namelijk de gemiddelde waterstand doen verhogen, maar de verlaging van het minimumpeil kan de gemiddelde waterstand weer doen laten zakken.

7 Effect van de maatregelen op het watersysteem gedurende een droog en een nat scenario

In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat het effect van een peilverlaging en een accoladeprofiel is op de water in- en uitlaat gedurende een droog scenario. Daarnaast wordt ook onderzocht welk effect deze maatregelen hebben op de maximum peilstijging en de minimum drooglegging gedurende een nat scenario. Vervolgens is de urgentie bepaald van de knelpunten die door de maatregelen worden veroorzaakt. Uiteindelijk is op basis van effectiviteit een maatregelenpakket aanbevolen.

7.1 In- en uitlaat van water gedurende een droge periode

De in- en uitlaat van water gedurende de periode 29 juli 2003 tot en met 29 augustus 2003 is met het Sobek model berekend. Deze periode valt binnen de droogte $T = 10$. De keus om een verkorte periode in een droogte $T = 10$ te selecteren, is onderbouwd in de paragraaf over het referentie scenario in bijlage 4.

De water in- en uitlaat is berekend voor de huidige situatie, welke is gedefinieerd als het referentie scenario. Daarnaast is de water in- en uitlaat ook bepaald voor het watersysteem, waarin de verlaging van het minimumpeil en/of het accoladeprofiel zijn geïmplementeerd. Het effect van de maatregelen op water in- en uitlaat gedurende de droge periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 is op deze manier duidelijk gemaakt.

In tabel 7 staat de in- en uitlaat van water in het referentie scenario en in de scenario's met de verschillende maatregelen. Maatregel 1 en maatregel 2 staan voor een verlaging van het minimumpeil met respectievelijk 10 en 20 centimeter. Het toepassen van het accoladeprofiel is gedefinieerd als maatregel 3. Maatregel 4 en 5 staan voor de toepassing van het accoladeprofiel in combinatie met respectievelijk 10 en 20 centimeter verlaging van het minimumpeil.

Uit tabel 7 blijkt dat er gedurende de droge periode van 29 juli 2003 tot en met 29 augustus 2003 geen uitlaat van water nodig is, volgens de opgestelde scenario's.

Wat betreft de inlaat van water, resulteert de peilverlaging van 10 en 20 centimeter tot een verminderde externe wateraanvoer. Dit is ook logisch, omdat het gemaal later kan starten met het pompen van water richting het projectgebied. Het duurt namelijk langer voordat het oppervlaktewaterpeil onder het minimumpeil zakt.

Opvallend is dat maatregel 3, het toepassen van een accoladeprofiel, niet leidt tot een verminderde inlaat van water. Dit komt waarschijnlijk omdat de berging van de watergang alleen is afgenomen onder het zomer streefpeil van 8,70 meter + NAP, aangezien de plasberm op deze hoogte is gedimensioneerd. In het referentie scenario en in het scenario met het accoladeprofiel is het zomer streefpeil ook het minimumpeil en dus blijft het water vrijwel altijd net boven de plasberm staan. Het gemaal moet in dit scenario nog evenveel water het watersysteem inpompen om het oppervlaktewaterpeil boven het minimumpeil te houden. Wegzijging- en verdampingsverliezen blijven ongeveer gelijk aan het referentiescenario, omdat in dit scenario de natte omtrek en het oppervlak open water niet tot nauwelijks veranderen.

Het toepassen van een accoladeprofiel werkt dus alleen effectief als een lager minimumpeil wordt ingesteld dan de hoogte van de plasberm. In maatregel 4 en 5 is deze combinatie toegepast en bij deze scenario's is ook te zien dat de inlaat van water afneemt ten opzicht van het referentiescenario.

	Referentie	Maatregel 1 (- 0,10 m)	Maatregel 2 (- 0,20 m)	Maatregel 3 (acc.)	Maatregel 4 (acc. - 0,10 m)	Maatregel 5 (acc. - 0,20 m)
Waterinlaat over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003 (mm)	31,3	28,6	26,1	31,3	25,8	22,8
Wateruitlaat over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003 (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

tabel 7: Water in- en uitlaat in verschillende scenario's over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003

7.2 Toetsing van het watersysteem aan bui T = 10 + 10%

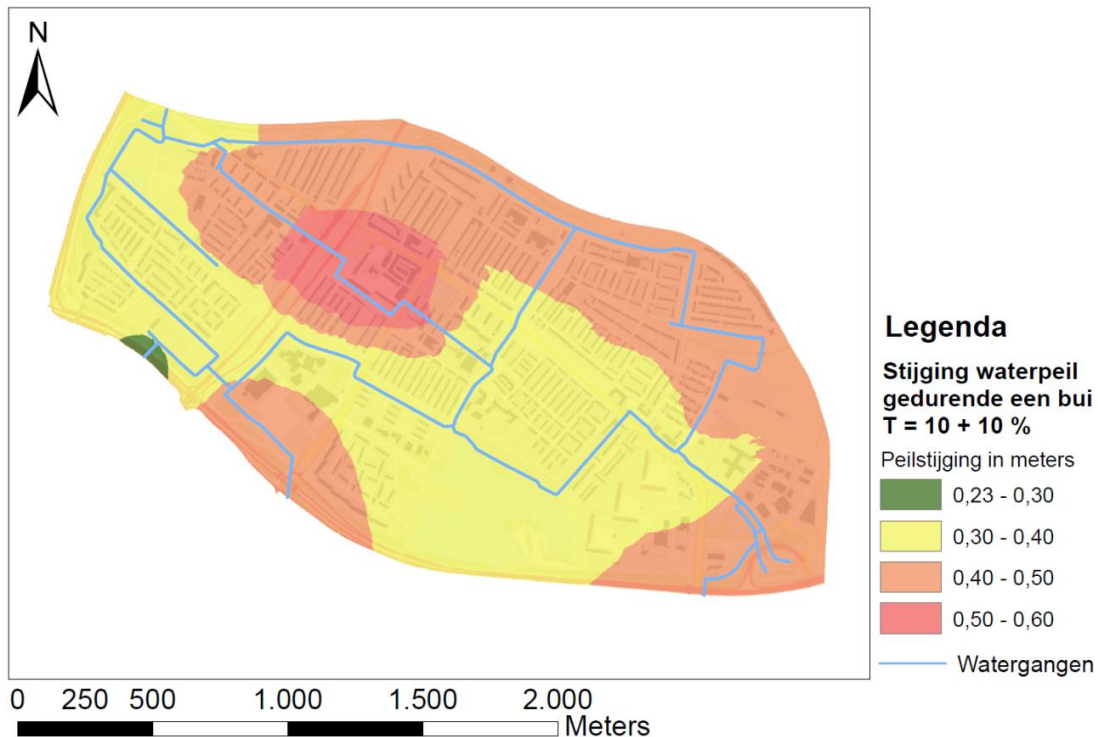
In deze paragraaf wordt de maximum peilstijging gedurende een bui T = 10 + 10% berekend voor de verschillende scenario's. De maximum peilstijging is berekend voor het referentie scenario en voor de scenario's met de maatregelen 1 tot 5. Vervolgens is bepaald of de maatregelen leiden tot een toename in maximum peilstijging gedurende een bui T = 10 + 10%.

De eis voor het watersysteem is dat de bui T = 10 + 10% niet mag leiden tot een maximum peilstijging van meer dan 30 centimeter.

7.2.1 Referentie scenario

Figuur 29 geeft de maximum peilstijging weer in het referentie scenario gedurende een bui T = 10 + 10%. Uit het figuur blijkt dat in het referentie scenario niet wordt voldaan aan de maximum peilstijging van 30 centimeter gedurende deze bui.

De overschrijding van de maximum peilstijging is mogelijk het gevolg van het feit dat uitsluitend de stuw bij het Gelredome water uit het projectgebied kan laten. Het oppervlaktewaterpeil in het watersysteem stijgt in korte tijd veel sneller dan dat de stuw het oppervlaktewaterpeil kan laat dalen. Voornamelijk het deel van de Arkelduiker, wat bovengronds is gehaald, heeft te maken met een flinke peilstijging, namelijk tussen de 0,50 en 0,60 meter. Dit kan verklaard worden doordat de relatief korte watergang aan weerszijden is verbonden met een duiker. Regenwater dat in deze watergang stroomt, kan door de weerstanden van de duikers niet snel wegstromen en vervolgens zal een grote maximum peilstijging worden bewerkstelligd.



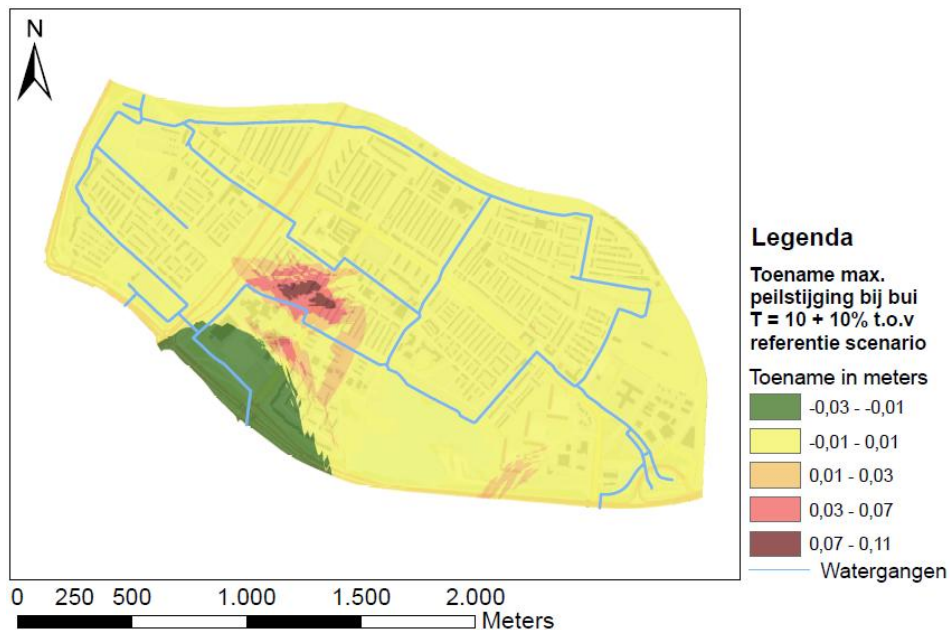
figuur 29: Maximale peilstijging in het referentie scenario gedurende een bui T= 10 + 10%

7.2.2 Verlaging minimumpeil scenario

In bijlage 6 is de maximum peilstijging weergegeven gedurende een bui T = 10 + 10%, wanneer het minimumpeil wordt verlaagd met 10 centimeter. Figuur 30 geeft het verschil aan in maximum peilstijging tussen het referentie scenario en het scenario waarin het minimumpeil met 10 centimeter wordt verlaagd.

Volgens deze kaarten neemt in dit scenario op een aantal locaties de maximum peilstijging gedurende een bui T = 10 + 10% toe ten opzichte van het referentie scenario.

Gewijzigde stuwhoogtes kunnen een verklaring zijn voor deze toename in maximum peilstijging. Toch is het niet heel aannemelijk dat deze maatregel op sommige locaties in zoveel extra peilstijging resulteert, aangezien de berging van de watergangen niet is veranderd. De extra peilstijging kan daarom ook te wijten zijn aan een interpolatie fout van ArcGIS.



figuur 30: Verschil in maximum peilstijging tussen referentie scenario en minimum peilverlaging scenario.

Een onderzoek naar het effect van 20 centimeter verlaging van het minimumpeil op de maximum peilstijging gedurende een bui T = 10 + 10%, leidt tot vrijwel dezelfde resultaten als de eerste kaart in bijlage 6 en als de kaart in figuur 30.

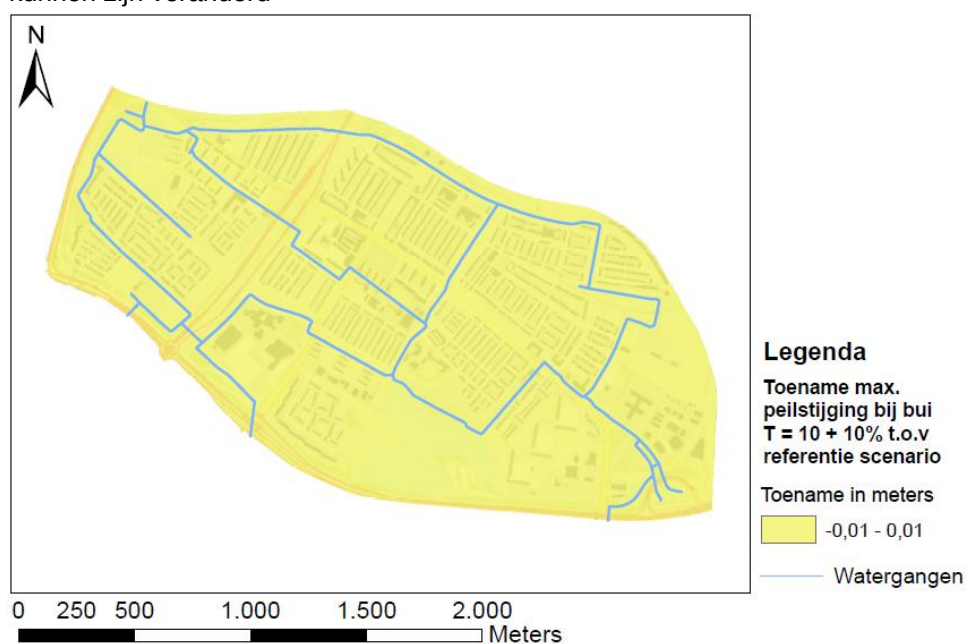
De oorzaak voor de extra peilstijging is opnieuw te verklaren vanuit gewijzigde stuwhoogtes of een interpolatie fout van ArcGIS.

7.2.3 Accoladeprofiel scenario

De maximum peilstijging in het accolade profiel scenario gedurende een bui T = 10 + 10% is weergegeven in bijlage 6. Het verschil tussen de maximum peilstijging in het referentie scenario en in het accoladeprofiel scenario is weergegeven in figuur 31.

Uit deze kaarten blijkt dat het accolade profiel niet tot nauwelijks extra peilstijging leidt gedurende een bui T = 10 + 10%.

Dat de maatregel niet of nauwelijks tot extra peilstijging leidt is logisch, aangezien de berging boven het zomer streefpeil niet is gewijzigd. Wel zal de weerstand in de waterlopen enigszins kunnen zijn veranderd



figuur 31: Verschil in maximum peilstijging tussen referentie scenario en accolade profiel scenario.

7.2.4 Accolade profiel in combinatie met peilverlaging scenario

Het accoladeprofiel in combinatie met 10 of 20 centimeter verlaging van het minimum peil, resulteert, wat betreft de maximum peilstijging gedurende een bui $T = 10 + 10\%$, in een combinatie van de kaarten in bijlage 6 en in een combinatie van figuur 30 en figuur 31.

Alleen de verlaging van het minimumpeil heeft ten opzichte van het referentie scenario een significant effect op de extra maximum peilstijging gedurende een bui $T = 10 + 10\%$.

7.3 Toetsing van het watersysteem aan bui $T = 100 + 10\%$

Deze paragraaf zal het watersysteem toetsen aan de normen voor een bui $T = 100 + 10\%$.

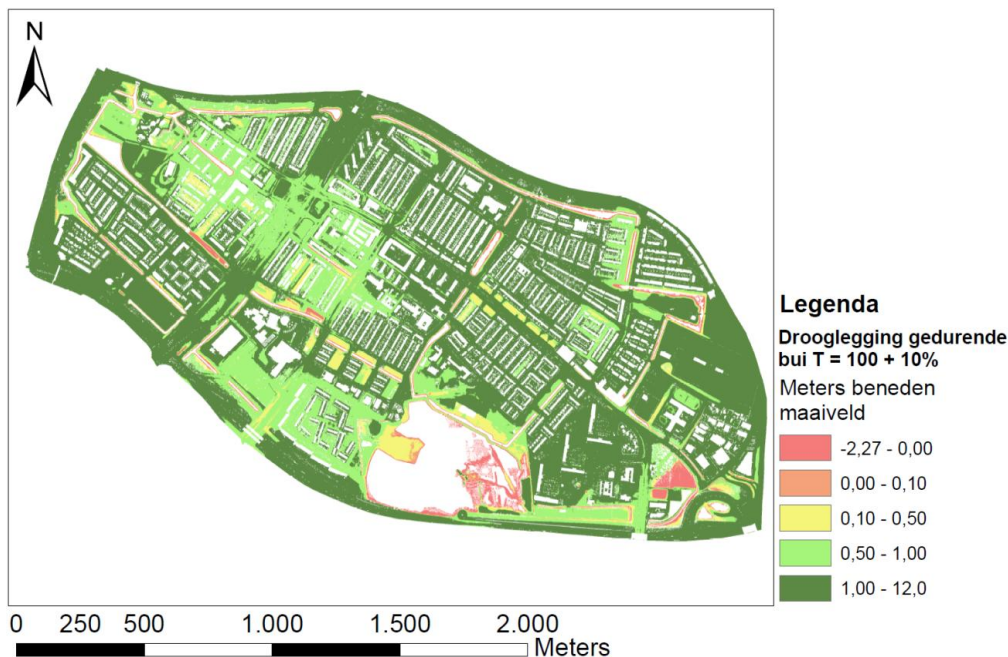
De minimum drooglegging gedurende deze bui is bepaald voor het referentie scenario en voor de scenario's met de maatregelen 1 tot 5. Aan de hand van de berekende maximum waterstanden is bepaald hoe de maatregelen de minimum drooglegging gedurende een bui $T = 100 + 10\%$ beïnvloeden.

De eis voor het watersysteem is dat de bui $T = 100 + 10\%$ niet mag leiden tot een oppervlakte-waterpeil dat hoger is dan het maaiveld. Dit houdt in dat de minimum drooglegging nergens kleiner mag zijn dan 0 meter beneden het maaiveld.

7.3.1 Referentie scenario

In figuur 32 is de minimum drooglegging in het referentie scenario gedurende een bui $T = 100 + 10\%$ weergegeven. Uit het figuur blijkt dat in het referentie scenario niet wordt voldaan aan de minimum drooglegging van 0 meter beneden het maaiveld.

Dit figuur maakt duidelijk dat het oppervlak open water in de watergangen op diverse plekken uitbreidt. Daarnaast zal ook de waterplas Eimersweide uitbreiden. De relatief grote rode vlek in het zuidoosten van Malburgen, betreft een lager gelegen grasveld.



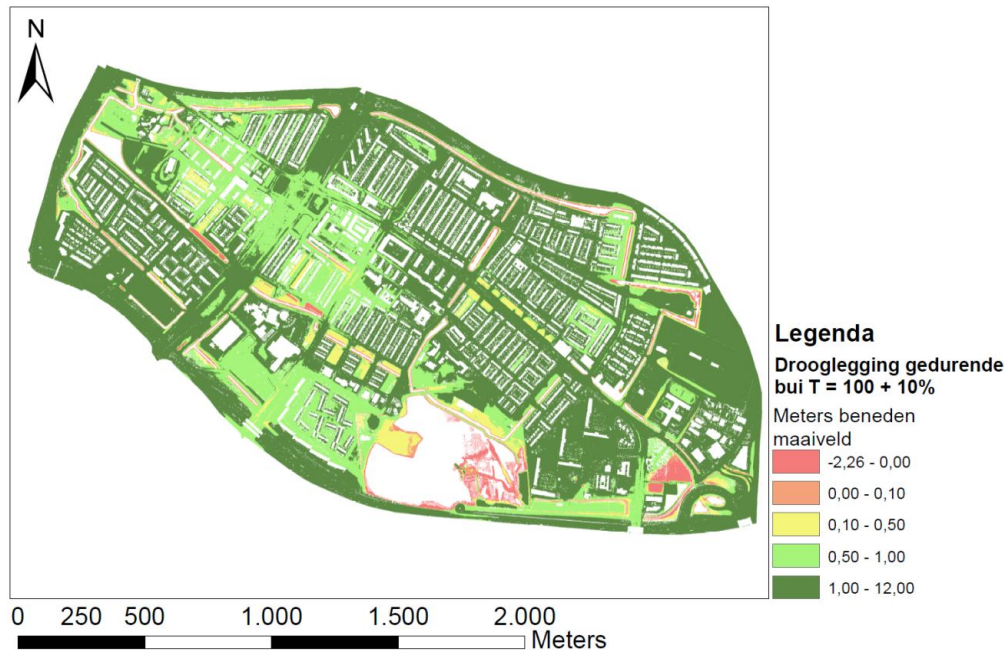
figuur 32: Minimum drooglegging in het referentie scenario bij een bui $T = 100 + 10\%$

7.3.2 Peilverlaging scenario

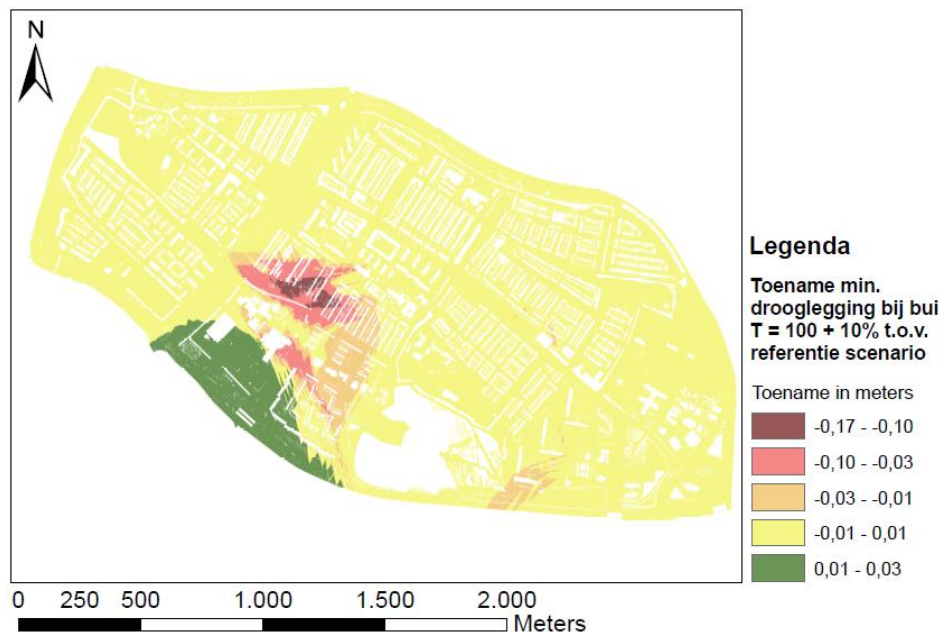
In figuur 33 is de minimum drooglegging weergegeven gedurende een bui $T = 100 + 10\%$, wanneer het minimum peil met 10 centimeter verlaagd wordt. Figuur 34 presenteert het verschil in minimum drooglegging tussen het referentie scenario en het scenario waarin het minimumpeil met 10 centimeter wordt verlaagd.

De watergang bij de Rijnhallen laat ten opzichte van het referentie scenario de grootste afname in minimum drooglegging zien. De minimum drooglegging kan op deze locatie met 17 centimeter afnemen gedurende een bui $T = 100 + 10\%$.

Gewijzigde stuwhoogtes of een interpolatiefout van ArcGIS kunnen opnieuw de verklaring zijn voor de relatief grote afname in minimum drooglegging op deze locatie. Uit figuur 33 blijkt dat deze afname in drooglegging resulteert in een toename van inundatie bij de watergang langs de Rijnhallen. Het overig deel van het projectgebied laat niet tot nauwelijks vermindering van de minimum drooglegging zien ten opzichte van het referentie scenario.



Figuur 33: Minimum drooglegging in het scenario met 10 centimeter peilverlaging gedurende een bui T = 100 + 10%



figuur 34: Verschil in minimum drooglegging tussen het referentie scenario en het scenario met 10 centimeter minimum peil verlaging

Een onderzoek naar het effect van 20 centimeter verlaging van het minimumpeil op de minimum drooglegging gedurende een bui T = 100 + 10%, leidt tot vrijwel dezelfde resultaten als verkregen in figuur 33 en figuur 34.

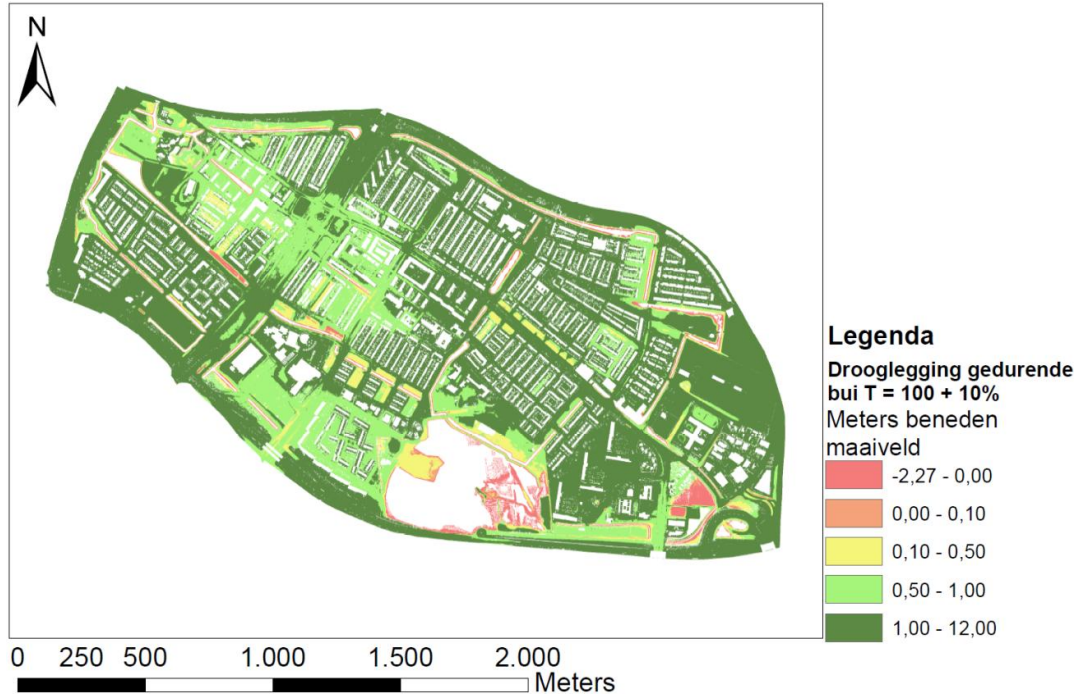
De verminderde drooglegging in dit scenario kan verklaard worden door gewijzigde stuwhoogtes of een interpolatiefout van ArcGIS.

7.3.3 Accoladeprofiel scenario

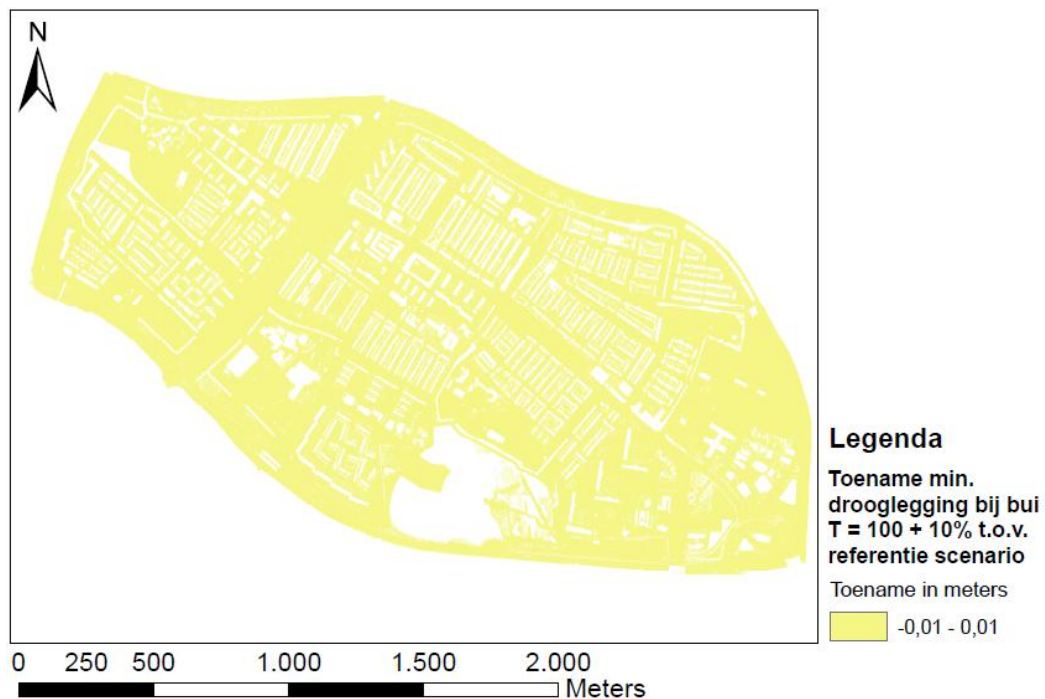
Figuur 35 geeft de minimum drooglegging weer in het accoladeprofiel scenario gedurende een bui $T = 100 + 10\%$. In figuur 36 is het verschil in minimum drooglegging te zien tussen het referentie scenario en het accoladeprofiel scenario.

Uit beide figuren blijkt dat het accoladeprofiel nauwelijks effect heeft op de minimum drooglegging gedurende een bui $T = 100 + 10\%$.

De oorzaak voor weinig verandering in de minimum drooglegging, is het feit dat de berging boven het zomer streefpeil niet is veranderd.



figuur 35: Minimum drooglegging in accoladeprofiel scenario gedurende bui $T = 100 + 10\%$



figuur 36: Verschil in minimum drooglegging tussen referentie scenario en het accoladeprofiel scenario

7.3.4 *Accoladeprofiel in combinatie met peilverlaging scenario*

Wat betreft de minimum drooglegging, resulteert de combinatie van het accoladeprofiel met 10 of 20 centimeter verlaging van het minimumpeil, in een combinatie van figuur 33 en figuur 35 en in een combinatie van figuur 34 en figuur 36.

Alleen de verlaging van het minimumpeil heeft ten opzichte van het referentie scenario een significant effect op de minimum drooglegging gedurende een bui $T = 100 + 10\%$.

7.4 **Aanbevolen maatregelen**

In deze paragraaf wordt een maatregelpakket aanbevolen om het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer. Om een aanbeveling te kunnen doen, is de urgentie van de potentiële knelpunten bepaald. Uiteindelijk is op basis van effectiviteit een maatregelpakket aanbevolen.

7.4.1 *Urgentie potentiële knelpunten als gevolg van de maatregelen*

Zoals beschreven staat in hoofdstuk 6 kunnen de genoemde maatregelen resulteren in verdroging, oxidatie en in een afname van de zuurstofconcentratie in het oppervlaktewater. Daarnaast is een toename mogelijk in de jaarlijkse hoeveelheid uitgelaten water. De potentiële knelpunten verdroging, oxidatie en verminderde zuurstofconcentratie gaan alleen op voor heel droge perioden die over het algemeen niet zo frequent en slechts voor een kort tijdsbestek optreden.

Wat betreft de toename van wateruitlaat, kan er voor gekozen worden om de stuw bij het Gelredome bij een hoger waterpeil water te laten afvoeren dan in het referentiescenario.

Uit paragraaf 7.1 is gebleken dat het toepassen van een accoladeprofiel niet resulteert in een verminderde water inlaat ten opzichte van het referentie scenario. Het accoladeprofiel vermindert de externe wateraanvoer alleen in combinatie met een verlaging van het minimumpeil. Aangezien het doel van dit onderzoek juist het verminderen van de externe wateraanvoer is, behoort het toepassen van uitsluitend het accolade profiel (maatregel 3) niet meer tot de opties voor herinrichting.

Uit paragraaf 7.2 is gebleken dat in het referentie scenario al niet wordt voldaan aan de normen voor een bui $T = 10 + 10\%$. In figuur 30 wordt duidelijk dat verlaging van het minimumpeil resulteert in een grotere maximum peilstijging gedurende een bui $T = 10 + 10\%$ dan de maximum peilstijging gedurende diezelfde bui in het referentiescenario.

Het is niet met zekerheid te zeggen of deze resultaten een betrouwbaar beeld van de werkelijkheid zijn. Aannemende dat deze maatregel daadwerkelijk tot een grotere maximum peilstijging leidt, is er geen zicht op natschade wat veroorzaakt kan worden door deze hoge peilen. Daarnaast valt de extra peilstijging in het niet bij de maximum peilstijging die nu al optreedt bij een bui $T = 10 + 10\%$.

In paragraaf 7.3 is te lezen dat het watersysteem niet voldoet aan de normen voor een bui $T = 100 + 10\%$. Uit figuur 34 blijkt dat het verlagen van het minimumpeil resulteert in een kleinere drooglegging gedurende deze bui dan in het referentie scenario. Opnieuw kunnen er vraagtekens worden geplaatst bij deze resultaten, maar uitgaande van de berekende minimum drooglegging in het peilverlaging scenario, blijkt ernstige schade als gevolg van inundatie niet reëel. De locaties waar inundatie optreedt, zijn geïnspecteerd in het veld en daaruit is geconcludeerd dat bebouwing niet direct met inundatie te maken krijgt.

Oftewel, alleen maatregel 3, het toepassen van een accoladeprofiel, kan op basis van het genoemde knelpunt niet meer worden aanbevolen. De overige potentiële knelpunten die de maatregelen veroorzaken in het watersysteem, zijn te overzien en weerhouden niet om één van vier overgebleven maatregelen aan te bevelen.

7.4.2 Effectiviteit maatregelen

Met uitzondering van maatregel 3, kan op basis van effectiviteit een maatregelenpakket worden aanbevolen. tabel 8 drukt de effectiviteit van de maatregelen uit door per maatregel aan te geven met hoeveel procent de water in- en uitlaat wordt gereduceerd ten opzichte van het referentie scenario. De reductie is berekend over de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

	Referentie	Maatregel 1 (- 0,10 m)	Maatregel 2 (- 0,20 m)	Maatregel 3 (acc.)	Maatregel 4 (acc. - 0,10 m)	Maatregel 5 (acc. - 0,20 m)
Reductie waterinlaat over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003 (%)	0,0	8,7	16,6	0,0	17,4	27,3
Reductie wateruitlaat over de periode 29 juli 2003 - 29 augustus 2003 (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

tabel 8: Effect maatregelen op water in- en uitlaat gedurende de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003

Zoals al in paragraaf 4.3.2.2 is beschreven, moet er voorzichtig worden omgesprongen met de berekende waarden, aangezien onzekerheden de betrouwbaarheid van de modellen hebben beïnvloed. tabel 8 geeft aan welke maatregel het meest effectief is en daarnaast geeft het een richting in de effectiviteit van de maatregelen ten opzichte van het referentie scenario en ten opzichte van elkaar.

Het is aannemelijk dat de modellen de hoeveelheid wegzijging hebben onderschat, omdat de berekende grondwaterstanden minder diep uitzakken dan de gemeten stijghoogtes. Aangezien de maatregelen onder andere inspelen op wegzijging, is het mogelijk dat daarom ook de effectiviteit van de maatregelen wordt onderschat.

Uit tabel 8 blijkt dat de wateruitlaat niet wordt beïnvloed door de maatregelen gedurende de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

Een peilverlaging van 10 centimeter en 20 centimeter leidt tot respectievelijk 8,7 % en 16,6 % minder inlaat van water. Het toepassen van een accoladeprofiel in combinatie met 10 centimeter verlaging van het minimumpeil leidt tot 17,4 % minder waterinlaat. Echter, het meest effectief is het toepassen van een accoladeprofiel in combinatie met 20 centimeter verlaging van het minimumpeil. De waterinlaat wordt door deze maatregel gereduceerd met 27,3 % in de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003.

Kortom, het toepassen van een accoladeprofiel in combinatie met 20 centimeter verlaging van het minimumpeil wordt aanbevolen om watersysteem Malburgen minder afhankelijk te maken van externe wateraanvoer.

Als aangenomen wordt dat de 27,3% reductie voor het hele jaar geldt, betekent dit dat er over heel 2003 circa 48.000 m³ water kon worden bespaard in Malburgen. Deze hoeveelheid water hoeft dan niet onttrokken worden uit de zoetwater voorraad van de Betuwe.

8 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen gegeven. De paragraaf conclusies geeft in de eerste alinea antwoord op de centrale hoofdvraag. Daarna volgt de onderbouwing vanuit de kernhoofdstukken. In de paragraaf aanbevelingen wordt concreet advies gegeven voor het implementeren van maatregelen of ter verbetering of uitbreiding van dit onderzoek.

8.1 Conclusies

Wat is, met het oog op duurzame en klimaatrobuuste herinrichting, de meest effectieve manier om het watersysteem van Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer?

Met het oog op duurzame en klimaat robuuste herinrichting is de meest effectieve manier, om het watersysteem van Malburgen zo min mogelijk afhankelijk te maken van externe wateraanvoer, het toepassen van accoladeprofielen in de watergangen in combinatie met 20 centimeter verlaging van het minimumpeil.

Wat zijn de gebiedskarakteristieken van projectgebied Malburgen?

Een belangrijk gebiedskarakteristiek van Malburgen is dat het grond- en oppervlaktewater altijd sterk onder invloed hebben gestaan van de rivieren. Voor de aanleg van de bandijk in 1935 kon het watersysteem van Malburgen nog getypeerd worden als een uiterwaardsysteem, waarin overstromingen nog regelmatig plaatsvonden. Momenteel worden oppervlaktewater en grondwater meer gereguleerd, waardoor de natuurlijke dynamiek is afgenomen.

Echter, de zandige ondergrond van Malburgen en de kleine afstand tot de Nederrijn, laten de grondwaterstanden nog steeds sterk correleren aan de rivierstanden. Hoge rivierstanden resulteren in de stroming van rivier- en Veluwe kwel naar Malburgen, terwijl lage rivierstanden water laten weg zijgen uit de woonwijk. De fluctuaties in de grondwaterstand zijn ook heel bepalend voor de aanvulling en infiltratie van het oppervlaktewater.

Hoe werkt het huidige watersysteem van Malburgen gedurende een droge periode?

Wegzijging was in de droge periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 de belangrijkste verliespost voor water. Lage rivierstanden resulteren in een drainerend effect, waardoor de wijk Malburgen kwetsbaar wordt voor waterverlies door wegzijging van water. Daarnaast verdween ook veel water uit Malburgen als gevolg van verdamping. De grondwaterberging nam daardoor sterk af, maar de oppervlaktewaterberging bleef stabiel door de aanvoer van water.

Wat zijn de doelstellingen, eisen en criteria voor de gewenste situatie van watersysteem Malburgen?

De relatief grote waterverliezen gedurende droge perioden worden niet effectief opgevangen door constant maar water aan te voeren. De gewenste situatie is om met minder externe wateraanvoer het watersysteem toch duurzaam en klimaatrobuust in te richten.

Welke maatregelen kunnen het watersysteem van Malburgen minder afhankelijk maken van externe wateraanvoer?

De gewenste situatie kan worden benaderd door het verlagen van het minimum oppervlaktewaterpeil met 10 of 20 centimeter. Op deze manier kunnen waterverliezen met minder water gecompenseerd worden om aan het minimumpeil te kunnen blijven voldoen.

Een andere maatregel is het toepassen van een accoladeprofiel in de watergangen. Door een kleinere berging onder de plasberm is minder water nodig om het minimumpeil te kunnen handhaven. Daarnaast nemen verdamping en wegzijging af als het water onder de hoogte van de plasberm zakt, door respectievelijk een kleiner oppervlak open water en een kleinere natte omtrek van de watergang.

Wat is het effect van de maatregelen op het watersysteem gedurende een uiterst droog en een uiterst nat scenario?

Er zijn ook potentiële knelpunten voor het verlagen van het minimumpeil. In tijden van droogte zullen oppervlakte- en grondwaterstanden dieper uitzakken, waardoor verdroging van vegetatie, oxidatie in cultuurhistorische elementen en een afnemende zuurstofconcentratie in het water kunnen optreden.

Daarnaast is een potentieel knelpunt voor het accoladeprofiel de toenemende jaarlijkse wateruitlaat als gevolg van een kleiner bergend vermogen in de watergang.

Een belangrijk potentieel knelpunt van het accoladeprofiel is dat de externe wateraanvoer niet wordt verminderd. Dit is te verklaren doordat het waterpeil in dit scenario niet onder de plasberm mag zakken, waardoor het voordeel van de verkleinde berging niet wordt benut. Verder creëren alle maatregelen een watersysteem dat niet voldoet aan de normen voor een $T = 10 + 10\%$ en $T = 100 + 10\%$ bui. In de huidige situatie wordt ook niet voldaan aan deze normen, maar een verlaging van het minimumpeil verslechtert de situatie. Dit is te verklaren door gewijzigde stuwinstellingen.

Welk maatregelenpakket wordt op basis van effectiviteit aanbevolen om de gewenste situatie te zo goed mogelijk te kunnen benaderen?

Het uitsluitend toepassen van een accoladeprofiel behoort niet tot de opties, aangezien de externe wateraanvoer niet wordt verminderd. De overige potentiële knelpunten weerhouden niet om één van de overgebleven maatregelen aan te bevelen, omdat deze knelpunten slechts zelden optreden, weinig tot geen schade tot gevolg hebben of relatief gemakkelijk te verhelpen zijn.

Het toepassen van een accoladeprofiel in de watergangen in combinatie met een verlaging van het minimumpeil met 20 centimeter is het meest effectief gebleken en wordt aanbevolen ter implementatie.

In het gemodelleerde watersysteem wordt de externe wateraanvoer in de droge periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 met 27% gereduceerd als gevolg van dit maatregelenpakket. Over het hele jaar 2003 betekent dit dat er in de wijk Malburgen circa 48.000 m³ water bespaard kon worden. Dit water hoeft dan niet worden onttrokken uit de Betuwe.

8.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze rapportage worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Er wordt aanbevolen om de water aan- en afvoer, en de oppervlaktewaterstanden in Malburgen te gaan meten. Daarnaast is het wenselijk dat de stuwhoogtes van het watersysteem bekend zijn. Op deze manier is het mogelijk een gekalibreerd watermodel van Malburgen op te stellen. Met dit model kan de werking van het huidige watersysteem en de effecten van de maatregelen op het watersysteem betrouwbaarder worden ingeschat.
- Er wordt aanbevolen om meer informatie te verzamelen over de deklaag in Malburgen, zodat de weerstanden van de deklaag op verschillende locaties in het projectgebied beter kunnen worden benaderd. Daarnaast geeft de dikte van de holocene deklaag aan in hoeverre de watergangen deze laag insnijden. Uiteindelijk kan op deze manier ook een duidelijker beeld gevormd worden van kwel en wegzijging in het gebied.
- Er wordt aanbevolen om andere gebruikers van het water uit de Linge te controleren op de effectiviteit waarmee ze dit water gebruiken. Voor stedelijke gebieden zou een soortgelijke studie als deze kunnen worden uitgevoerd. Wellicht kunnen andere gebieden ook heringericht worden om zo waterverliezen te beperken, waardoor de zoetwatervoorraad in de Betuwe minder onder druk komt te staan gedurende droge perioden.
- Er wordt aanbevolen om het watersysteem met accoladeprofielen en een verlaagd minimumpeil met regelmaat te onderhouden. Het is aannemelijk dat de verkleinde waterberging als gevolg van het accoladeprofiel in combinatie met de lage stroomsnelheid in het gebied sneller resulteert in dichtslibbing van de watergang. Dit effect wordt versterkt als het waterpeil dieper mag uitzakken ten opzichte van de huidige situatie. Op deze manier kan droogval van watergangen optreden, wat niet wenselijk is voor ecologie, beeldkwaliteit en stank. Deze problemen kunnen worden voorkomen en beperkt door de watergangen regelmatig uit te maaien en te baggeren. De onderhoudsfrequentie is afhankelijk van de staat waarin de watergang verkeerd.
- Er wordt aanbevolen om het huidige watersysteem en het watersysteem met geïmplementeerde maatregelen door te rekenen voor meerdere jaren. Op deze manier wordt meer inzicht verkregen in het effect van de maatregelen op de jaarlijkse water aan- en afvoer van Malburgen.

- Er wordt aanbevolen om de Arkelduiker geheel bovengronds te halen. Momenteel is slechts een gedeelte van de watergang bovengronds gehaald, maar zijn weerszijden van deze watergang nog verbonden met een lange duiker. Als er in korte tijd veel neerslag valt, resulteert dit in hoge waterstanden in deze watergang, omdat het water niet snel weg kan stromen als gevolg van de weerstand die de duikers bieden. Door het gedeeltelijk of geheel verwijderen van deze duikers neemt de weerstand af en stroomt het water makkelijker weg, waardoor de oppervlaktewaterstand in de bovengrondsgehaalde watergang minder hoog wordt.

Reflectie

In dit hoofdstuk wordt de inhoud van de rapportage, de methodiek van het onderzoek en het persoonlijk functioneren van de student gereflecteerd.

Inhoud

De onderdelen in dit rapport zijn nodig gebleken om tot een constructief antwoord te kunnen komen op de gestelde hoofdvraag.

Het bleek wel moeilijk om uitspraken te kunnen doen over de betrouwbaarheid van de berekende resultaten. De modellen hebben immers gerekend met een watersysteem van Malburgen dat water efficiënter aan- en afvoert dan in werkelijkheid. Daarnaast was het moeilijk om het effect van de rivier op watersysteem Malburgen te modelleren.

Methodiek

De gebruikte methodiek heeft goed gewerkt om tot een antwoord te komen op de hoofdvraag. Er is op sommige punten wel afgeweken van het plan van aanpak.

In het plan van aanpak wordt gesproken over een watersysteem beschrijving maar niet over een analyse van de werking van het watersysteem. In het onderzoek is door middel van modellen deze analyse wel uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de werking van het watersysteem.

In het plan van aanpak staat beschreven dat water in- en uitlaat gedurende een droog en een nat scenario wordt berekend. De water in- en uitlaat is uiteindelijk alleen berekend voor het droge scenario, omdat er in het natte scenario geen externe wateraanvoer is.

In het plan aanpak wordt beschreven dat het spreadsheetmodel ook gebruikt wordt om te bepalen hoeveel effect de gesuggereerde maatregelen hebben op de externe wateraanvoer. Dit is uiteindelijk alleen door middel van het Sobek model gedaan.

Het accoladeprofiel kon namelijk niet geïmplementeerd worden in het spreadsheetmodel.

De verlaging van het minimumpeil was ook niet goed te implementeren in het spreadsheetmodel, omdat in dit scenario beide modellen sterk afwijkende hoeveelheden wateraanvoer berekenen voor de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003. Over heel 2003 berekenen beide modellen vergelijkbare hoeveelheden wateraanvoer, maar in de korte periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 berekent het spreadsheetmodel veel minder wateraanvoer. De oorzaak is dat het spreadsheetmodel later begint met het aanvoeren van water. Door het berekenen van een minimale hoeveelheid wateraanvoer, konden de maatregelen in het spreadsheetmodel niet goed op effectiviteit worden ingeschat.

Persoonlijk functioneren

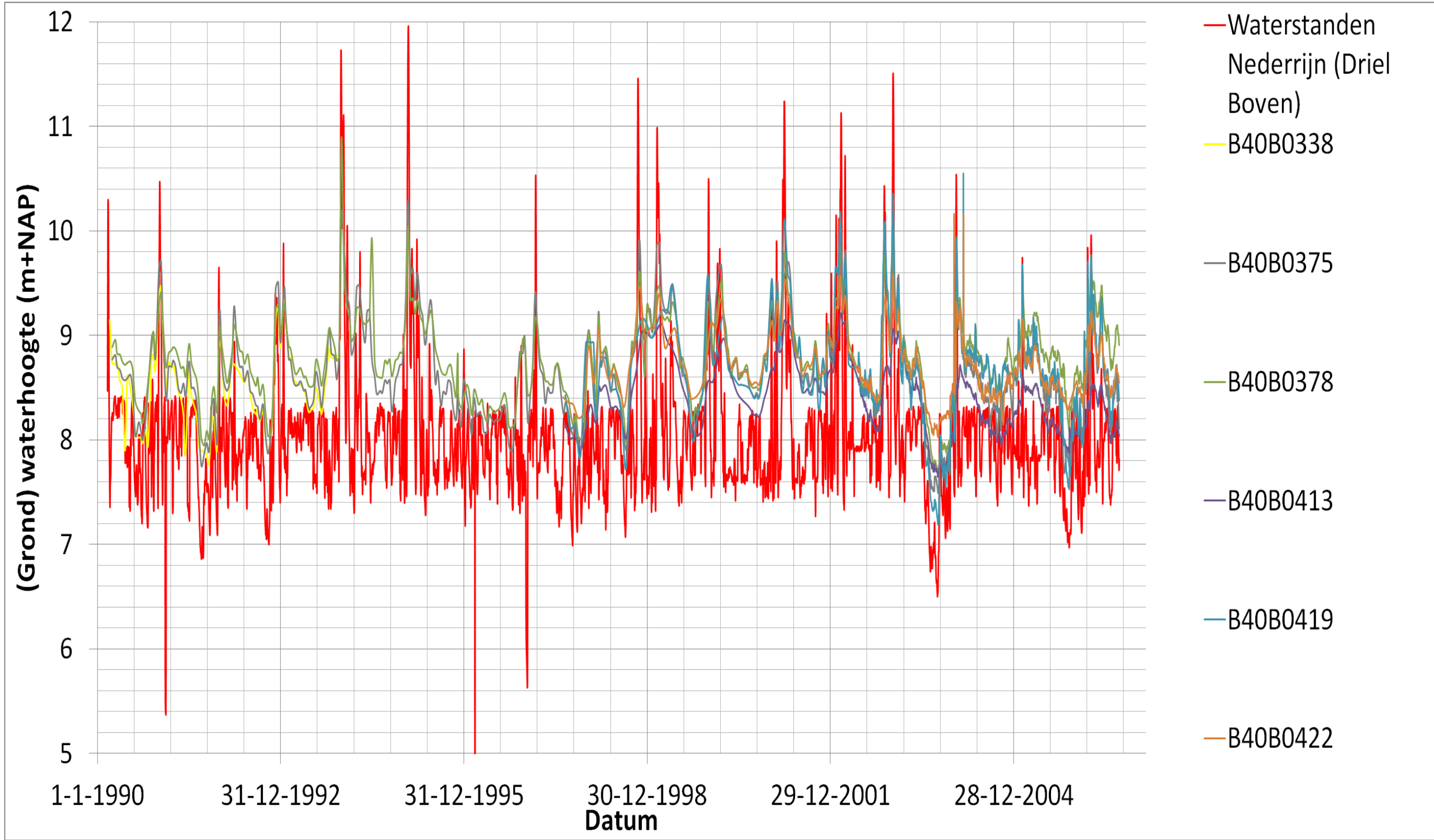
Wat betreft het persoonlijk functioneren gedurende mijn afstudeerperiode ben ik ervan overtuigd dat dit over het algemeen goed is verlopen. Er zijn voor mij enkele aandachtspunten naar voren gekomen die het functioneren kunnen verbeteren.

Wat betreft de planning is de benodigde tijd onderschat voor het opstellen van modellen en het komen tot de resultaten. Het was moeilijk om tevreden te zijn met de resultaten van de modellen en daarom werd er veel tijd gestopt in het verbeteren van de modellen. Dit resulteerde in een hoge tijdsdruk tijdens het opstellen van het definitieve rapport.

Het verzamelen van gegevens bij de verschillende partijen verliep niet altijd soepel. Eén partij heeft de manier waarop ik gegevens opvroeg als 'opdringerig' ervaren, aangezien zij niet deel wilden nemen in dit project. Ik ben er te snel van uitgegaan dat de partijen, waarvan ik gegevens nodig had, ook deel willen nemen in dit onderzoek. Een meer afwachtende manier van partijen benaderen is wenselijk voor het soepel verlopen van de samenwerking.

Tot slot, was er in het laatste stadium van mijn afstudeerperiode, beperkt overleg met mijn externe begeleider van Grontmij. Door de drukte waarin mijn externe begeleider verkeerde, was hij niet meer in de mogelijkheid om mij verder te begeleiden in dit stadium en daarom heb ik in deze periode een andere externe begeleider toegewezen gekregen. Dit was naar omstandigheden een prima oplossing, al ervoer ik dat overleg over het project moeilijker was geworden. Dit maakte het lastig om transparant te werken naar Grontmij.

Bijlage 1: Stijghoogtes en rivierstanden over de periode 1990 - 2006



Bijlage 2: Methodiek stijghoogte analyse

Voor de grondwateranalyse van paragraaf 3.5.2.1 zijn stijghoogtes van DINOluket gebruikt. Er is bij elk meetpunt onderzocht wat de stijghoogtes zijn volgens de verschillende filters. Door nihil verschil tussen de gemeten stijghoogtes op de verschillende dieptes, is gekozen om de stijghoogtes, die door filter 1 zijn gemeten, verder te analyseren en op te nemen in het rapport.

De gemiddelde laagste- en hoogste grondwaterstand per grondwatermeetpunt in Malburgen is bepaald door van elk hydrologisch jaar (april – maart) een gemiddelde te nemen van de drie laagste of de drie hoogste waarden. Vervolgens is het gemiddelde opnieuw bepaald over de geselecteerde tijdsperiode van acht jaar.

De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand is bepaald door per jaar het gemiddelde te nemen van de stijghoogte op 14 maart, 28 maart en 14 april. Doordat er niet altijd data beschikbaar was op de desbetreffende data is een speling aangenomen van maximaal drie dagen. Een stijghoogte die buiten deze 3 dagen speling ligt, is niet meegenomen in de berekening. Opnieuw is het gemiddelde over de tijdsperiode van acht jaar genomen, wat uiteindelijk de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand is geworden (Wageningen Universiteit, z.d.).

Bijlage 3: Achtergrond, doel en methodiek spreadsheetmodel Malburgen

In deze bijlage wordt aanvullende informatie gegeven over de achtergrond, het doel en de methodiek van het spreadsheetmodel.

Achtergrond

Het spreadsheetmodel Malburgen betreft een puntmodel, wat inhoudt dat er geen afzonderlijke watergangen in het model zijn geïmplementeerd. Onverzadigde zone, verzadigd grondwater en oppervlakte water zijn allemaal geschematiseerd tot één bak met voor ieder onderdeel een volume en een waterdruk of waterstand. Dit betekent ook dat er gerekend wordt met één gemiddeld oppervlaktewaterpeil en één gemiddelde grondwaterstand voor het hele gebied. Figuur 37 toont de manier waarop het spreadsheetmodel het watersysteem schematiseert (P.E. Dik, 2014).

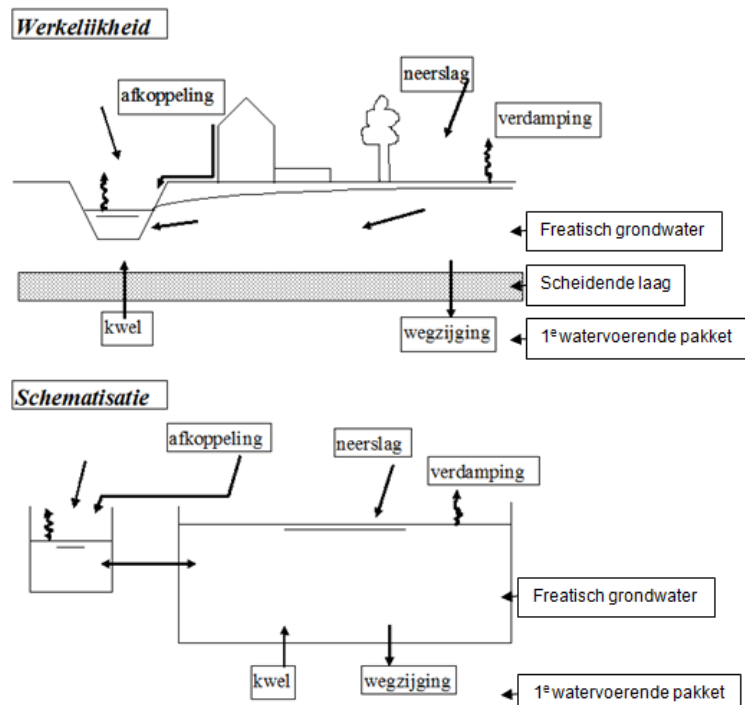
De inrichting van het gebied wordt uitgedrukt door een percentage open water, onverhard oppervlak, verhard oppervlak dat is aangesloten op de rioolwaterzuiveringsinstallatie en verhard oppervlak dat direct is afgekoppeld op het openwater (P.E. Dik, 2014).

Via neerslag komt er water het gebied binnen en verdamping van het oppervlak verhard, onverhard en open water laten water uit het gebied verdwijnen (P.E. Dik, 2014).

In de onverzadigde zone kan water worden geborgen in de wortelzone en de subzone (P.E. Dik, 2014).

Het freatisch grondwater heeft door kwel en wegzijging interactie met het eerste watervoerende pakket. De soort en mate van interactie wordt bepaald door de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de weerstand van de deklaag. Wanneer de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket hoger is dan de freatische grondwaterstand, is er sprake van kwel. Als de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket lager is dan het freatisch grondwater, is er sprake van wegzijging. Hoe hoger de weerstand van de deklaag hoe minder interactie tussen het freatische grondwater en het eerste watervoerende pakket.

Er is ook interactie tussen het oppervlaktewater en het freatische grondwater. Deze interactie vindt plaats via waterlopen, buisdrainage en het maaiveld. De stroming tussen het oppervlaktewater en het freatische grondwater is afhankelijk van weerstanden en het verschil tussen het oppervlaktewaterpeil en de grondwaterstand (P.E. Dik, 2014). Afhankelijk van het peilbeheer wordt een bepaalde hoeveelheid water in- of uitgelaten. De berekende hoeveelheden in- en uitlaat zijn gebaseerd op het totaal oppervlak. Stel dat er 5 millimeter water inlaat wordt berekend en er is 6% open water, dan stijgt het oppervlaktewaterpeil door deze inlaat ($0,005 \text{ m} / 0,06$) 8,3 centimeter (P.E. Dik, 2014).



Figuur 37: Schematisering van het watersysteem (P.E. Dik, 2014)

Doel

Het spreadsheetmodel Malburgen is bedoeld als verificatiemiddel van de werkelijkheid en het Sobek model.

Daarnaast is het spreadsheetmodel bedoeld om een waterbalans van het gebied op te kunnen stellen voor een droge periode, zodat inzicht gekregen kan worden in de werking van het watersysteem in een droge periode.

Tot slot kan met dit model kwel en wegzijging worden berekend, wat vervolgens in het Sobek model kan worden ingevoerd.

Methodiek

Zoals beschreven staat in paragraaf 2.1.2 is het spreadsheetmodel geverifieerd met stijghoogtes uit het projectgebied die door DINOloket zijn gemeten. Voor de verificatie is de periode 1998 – 2006 gedraaid in het model en daarvoor is 1997 als inrekenjaar gebruikt. Door het veranderen van parameters is uiteindelijk een definitief model opgesteld dat resultaten levert die, voor dit onderzoek, voldoende overeenkomen met de gemeten waarden. De invoerwaarden van dit definitieve model zijn gebruikt om vervolgens het jaar 2003 te draaien. Het jaar 2002 is als inrekenjaar gebruikt. De resultaten van het jaar 2003 zijn bestemd als verificatiemiddel met het Sobek model.

Hieronder staat de onderbouwing van de parameters beschreven. Deze waarden zijn gebruikt voor zowel de periode 1998 - 2006 als het jaar 2003.

Inrichting

De inrichting van het gebied omvat het percentage openwater, verhard oppervlak afgekoppeld op de rioolwaterzuiveringsinstallatie, verhard oppervlak afgekoppeld op het oppervlaktewater en het onverhard oppervlak (P.E. Dik, 2014). Deze termen zijn bepaald aan de hand van de figuur 4 en het basisrioleringsplan van Arnhem voor 2009 - 2019.

Er is uitgegaan van een totaal oppervlak van circa 360 hectare. Het percentage open water is daarin 7%, verhard oppervlak verbonden met de rioolwaterzuiveringsinstallatie is 2%, het onverhard oppervlak is 42% en het verharde oppervlak wat direct is afgekoppeld op het oppervlaktewater is circa 49% van het totaal oppervlak.

Een deel van het gebied zal verhard zijn met klinkers en tegels. Dit houdt in dat er bij de meeste buien naast afstroming ook deels infiltratie plaatsvindt. Het spreadsheetmodel gaat ervan uit dat al het regenwater, wat op het verharde oppervlak valt, tot afstroming komt. Daarom is het aanmerkelijk dat een beter beeld van de werkelijkheid wordt verkregen als het verhard oppervlak in het spreadsheetmodel wordt verminderd. Het effect van regenwater op het freatische grondwater wordt op deze manier waarschijnlijk beter gesimuleerd. Op basis van de verificatie tussen de berekende grondwaterstanden en de gemeten stijghoogtes, is het afgekoppeld verharde oppervlak uiteindelijk vastgesteld op 30%.

Meteorologische gegevens

De meteorologische gegevens omvatten de neerslag en verdamping in het gebied. De neerslaggegevens van het meteorologisch station Arnhem zijn opgehaald van de website van het KNMI.

Daarnaast zijn de verdampingsgegevens van de Bilt gebruikt, aangezien andere meteorologische stations in de buurt van Arnhem niet over alle jaarlijkse verdampingsgegevens beschikken. Voor de benadering van de verdamping is ook het vegetatietype opgegeven en de gemiddelde verdamping van het verhard oppervlak.

Neerslag valt integraal op het gehele gebied, dus op zowel open water, verhard als onverhard oppervlak. Verdamping daarentegen verschilt per type oppervlak.

De actuele verdamping van het open water is gelijk aan 1,25 maal de referentie gewasverdamping.

Actuele verdamping op het onverharde oppervlak is afhankelijk van het vegetatietype en het vochtgehalte in de wortelzone. Om de actuele verdamping van het onverhard oppervlak te kunnen bepalen, is gekozen voor het vegetatietype gras.

Bovendien is er nog verdamping van het verhard oppervlak, aangezien een deel van de neerslag op dit oppervlak niet tot afstroming komt, maar door interceptie onder andere in laagten

achterblijft, waarna het vervolgens verdampt. Er is aangenomen dat 150 millimeter water verdampt op jaarbasis als het gehele gebied verhard is. Het percentage verhard oppervlak maal 150 millimeter geeft uiteindelijk de actuele verdamping van het verharde oppervlak weer. De verdeling van de actuele verdamping op het verhard oppervlak wordt nagebootst door de helft van de verdamping op het verharde oppervlak evenredig over het jaar te verdelen. De andere helft van de verdamping wordt eveneens evenredig verdeeld, maar ditmaal met de referentie gewasverdamping (P.E. Dik, 2014).

Onverzadigde zone

De onverzadigde zone bevat de parameters: maaiveldhoogte, bodemtype, dikte van de wortelzone, het initieel vochtgehalte van de wortelzone en de initiële flux karakteristiek van de subzone.

Het model gaat ervan uit dat het neerslagoverschot de onverzadigde zone voedt en vervolgens vindt er berging in de bodem plaats en vertraagde nalevering aan het verzadigd grondwater via de subzone (P.E. Dik, 2014).

De maaiveldhoogte in het gebied varieert veelal tussen de 10,5 en 11 meter + NAP. Op basis hiervan is besloten 10,75 meter als gemiddelde maaiveldhoogte in het projectgebied te nemen. Zware zavel is als bodemtype ingevoerd. Dit is gebaseerd op het rapport: Reconstructie sportpark de Bakenhof en op het rapport: Uiterwaardvergraving Meinerswijk (Grontmij, 2001; R. Lohrman, 2012). Bovendien is deze keus gebaseerd op de verificatie van de berekende grondwaterstanden met de gemeten stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket. Wanneer zware zavel wordt ingevoerd als bodemtype, berekent het spreadsheetmodel grondwaterstanden die overeenkomen met de gemeten stijghoogtes.

De dikte van de wortelzone is geschat op 0,30 meter, wat aannemelijk is voor het vegetatietype gras.

Het initieel vochtgehalte van de wortelzone staat op 0,25 wat een aannemelijke benadering van de werkelijkheid is.

De initiële flux karakteristiek van de subzone is geschat op 0,00 millimeter per dag.

Het initieel vochtgehalte van de wortelzone en de initiële flux karakteristiek van de subzone zijn niet van dermate grote invloed op de resultaten van het spreadsheetmodel, dat deze variabelen heel nauwkeurig moeten worden ingeschat.

Verzadigde zone

De verzadigde zone omvat de invoer van de initieel freatische grondwaterstand, de verticaal hydraulische weerstand van de deklaag, de gemiddelde stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, de jaarlijkse fluctuatie van de stijghoogte en de dag waarop de piek stijghoogte in het eerste watervoerende pakket optreedt.

Het model gaat ervan uit dat er uitwisseling van water plaatsvindt tussen het freatisch grondwater en het eerste watervoerende pakket door middel van kwel en wegzijging. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket wordt beschreven door een sinusfunctie. Wanneer de sinusfunctie boven de freatische grondwaterstand uitkomt, is er sprake van kwel. Indien de freatische grondwaterstand hoger is, dan is er sprake van wegzijging (P.E. Dik, 2014).

De initieel freatische grondwaterstand is vastgesteld op 8,42 meter + NAP en betreft een gemiddelde van de stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket rond de eerste van januari in de jaargangen 2004, 2005 en 2006. Het jaar 2004 is als startjaar gebruikt, omdat het pas vanaf circa 2004 mogelijk was om constant water aan te voeren naar Malburgen door de verbinding met de Linge. Het is aannemelijk dat de resultaten van het spreadsheetmodel het meest overeenkomen met de jaargangen na 2003, aangezien het spreadsheetmodel ook uitgaat van een onbeperkte water in- en uitlaat. Het jaar 2006 is als eindjaar gekozen, omdat DINOloket beschikt over stijghoogtemetingen tot 2006.

De weerstand van de deklaag is geschat op 400 dagen op basis van de verificatie van de berekende freatische grondwaterstanden met de gemeten stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket over de periode 1998 - 2006. Daarnaast is deze waarde ook gebaseerd op het gebieds-dossier van drinkwaterwinning Sijmons.

De gemiddelde stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is 8,46 meter + NAP. De filters van de peilbuizen staan onder de deklaag in het watervoerende pakket, wat dus een goede af-

spiegeling is van de stijghoogtes onder de deklaag. De gemiddelde stijghoogte is berekend over zes verschillende peilbuizen in het eerste watervoerende pakket gedurende de hydrologische jaren in de periode 2003-2006.

Dezelfde periode is geselecteerd om de gemiddelde jaarlijkse fluctuatie van de stijghoogtes in het watervoerende pakket te bepalen. De gemiddelde jaarlijkse fluctuatie van de stijghoogte is geschat op 1,48 meter.

Het dagnummer voor de piek stijghoogte is geschat op 90 dagen, omdat aan de hand van deze waarde de berekende freatische grondwaterstanden het beste overeenkomen met de gemeten stijghoogtes in het eerste watervoerende pakket.

Oppervlaktewater

Het oppervlaktewater omvat de initiële oppervlaktewaterstand, de drainage- en infiltratieweerstand van het oppervlaktewater, het maximum en minimum winter- en zomerpeil en de drainage- en infiltratieweerstand van buis- en maaiveld drainage (P.E. Dik, 2014).

Voor het maximum en minimum zomer- en winterpeil zijn een zomer- en een winterperiode aangehouden. De winterperiode is hierbij gedefinieerd als de periode van 1 oktober tot en met 31 maart en de zomerperiode van 1 april tot en met 30 september.

De initiële oppervlaktewaterstand is geschat op een gemiddelde van 9 meter in het hele gebied. Deze waarde is bepaald op basis van gemeten waardes bij de stuw van het Gelredome en op basis van veldwerk.

Voor de drainageweerstand van het oppervlakte water is 200 dagen gekozen en voor de infiltratieweerstand van het oppervlaktewater 500 dagen (B. Bot, 2011; P.E. Dik, 2015).

Dit is vastgesteld op basis van de verificatie van de berekende grondwaterstanden met de gemeten stijghoogtes. Daarnaast is ook advies van geohydroloog Pim Dik meegenomen en is het grondwaterzakboekje gebruikt. Bovendien is de onderstaande formule voor de drainage- en infiltratie weerstand toegepast (B. Bot, 2011).

Bij een drainerende situatie:

$$q_{fr \rightarrow opp} = \frac{(h_{fr} - h_{opp})}{C_{dr}} \text{ als } h_{fr} > h_{opp}$$

Bij een infiltrerende situatie:

$$q_{fr \rightarrow opp} = \frac{(h_{fr} - h_{opp})}{C_{inf}} \text{ als } h_{fr} < h_{opp}$$

$q_{fr \rightarrow opp}$	:	uitwisseling tussen het freatisch grondwater en het oppervlaktewater (m/d)
h_{fr}	:	freatische grondwaterstand (m + NAP)
h_{opp}	:	oppervlaktewaterpeil (m + NAP)
C_{dr}	:	drainageweerstand (d)
C_{inf}	:	infiltratieweerstand (d)

Voor de drainerende situatie is uit tabel 2 de maximum stijghoogte van het eerste watervoerende pakket bij peilbuis B40B0378 gebruikt. De maximum stijghoogte is 10,04 meter + NAP en trad in januari 2003 op. Het is aannemelijk dat het waterschap in een situatie van het hoogwater de waterstanden in de watergangen op maximaal 9,20 meter + NAP laat staan. Voor de drainageweerstand is 200 dagen gekozen. Als deze waardes in de formule voor de drainerende situatie worden ingevuld blijkt dat er 4,20 millimeter per dag van het freatische grondwater naar het oppervlakte water lekt. In figuur 16 is te zien dat er door het MORIA model ook tussen de 4 en 4,5 millimeter per dag aan kwel wordt berekend gedurende de hoogwatergolf in 1995.

Voor de infiltrerende situatie bij peilbuis B40B0378 wordt de situatie van oktober 2003 nagebootst, toen een minimum stijghoogte van 7,67 meter + NAP in het eerste watervoerende pakket optrad. De oppervlaktewaterstand is geschat op 8,70 meter + NAP en de infiltratieweerstand

op 500 dagen. Wanneer deze waardes worden ingevuld in de formule voor de infiltrerende situatie, blijkt dat er 2,06 millimeter per dag vanuit het oppervlaktewater naar het grondwater lekt. Volgens figuur 17 was er in de droge periode van 2003 op de locatie van peilbuis B40B0378 tussen de 2 en 3 millimeter wegzijging.

Kortom, de kwel en wegzijging die door middel van de drainage- en infiltratieweerstand berekend wordt in het spreadsheetmodel, komt redelijk overeen met de berekende waardes in het MORIA model.

Het zomer- en winter streefpeil van het waterschap Rivierenland onderbouwt de keus om het maximumpeil op 9,20 meter + NAP en het minimumpeil op 8,70 meter + NAP te zetten. Hierbij geldt wel dat in zowel zomer als winter het peil kan fluctueren tussen 8,70 meter + NAP en 9,20 meter + NAP. Dit is een goede weergave van de werkelijkheid, zoals die wordt weergegeven in figuur 20.

De drainageweerstand van de buisdrainage is op 100 dagen gezet en niet op de gebruikelijk 40 - 70 dagen. De onderbouwing hiervoor is dat de werkelijkheid leert dat in Malburgen alleen de grondwaterpieken worden afgevangen door buisdrainage, maar dat er geen structurele verlaging is van de grondwaterstand (R. Bos, 2015).

De infiltratieweerstand van de buisdrainage is zo ingesteld, dat deze ervan uitgaat dat de drainagebuizen niet tot nauwelijks lekken, wat inhoudt dat er geen infiltratie via de drainagebuizen plaatsvindt.

De ontwateringdiepte van de drainagebuizen is op 1 meter onder het maaiveld geschat.

Op advies van geohydroloog Pim Dik is de maaiveld drainage geschat op 10 dagen. Maaiveld drainage treedt alleen op als de grondwaterstand hoger is dan het maaiveld, maar dat is in de berekeningen niet het geval (P.E. Dik, 2015).

Aan de infiltratieweerstand van het maaiveld zijn zoveel dagen toegekend, dat er geen sprake is van infiltratie als de oppervlaktewaterstand boven de maaiveldhoogte uitkomt. Dit komt eveneens niet voor in de berekeningen (P.E. Dik, 2015).

Bijlage 4: Achtergrond, doel en methodiek Sobek model Malburgen

In deze bijlage wordt aanvullende informatie gegeven over de achtergrond, het doel en de methodiek van het Sobek model.

Achtergrond

Voor het onderzoek naar het watersysteem van Malburgen is door het waterschap Rivierenland een vlakdekkend Sobek Rural model aangeleverd. Vlakdekkend houdt in dat er voor de meeste parameters verschillende waarden ingevoerd kunnen worden. Het model is bij de meeste parameters dus niet afhankelijk van één gemiddelde waarde.

Uit het model van waterschap Rivierenland is het watersysteem van Malburgen geknipt en zijn knopen en verbindingen verwijderd, gewijzigd of aangepast.

Doel

Het Sobek model is bedoeld om inzicht te krijgen in de werking van het watersysteem Malburgen gedurende een droge periode. Er is daarom met dit model een waterbalans voor een droge periode opgesteld, zodat duidelijk wordt welke balansposten een belangrijke rol spelen in het gebied gedurende deze droge periode.

Het Sobek model is ook opgezet om te kunnen bepalen welk effect bepaalde maatregelen hebben op de in- en uitlaat van water in de wijk Malburgen gedurende een bepaalde periode in een droogte $T = 10$. Daarnaast wordt het model gebruikt om de maatregelen te toetsen aan de normen voor een bui $T = 10 + 10\%$ en een bui $T = 100 + 10\%$.

Methodiek

In het Sobek model Malburgen is het jaar 2003 doorgerekend als verificatie met het spreadsheetmodel. Er is een definitief Sobek model opgesteld door de parameters continue te wijzigen totdat de resultaten van het Sobek model voldoende overeenkwamen met de resultaten van het spreadsheetmodel. De invoerwaardes van dit definitieve model zijn zoveel mogelijk aangehouden bij het modelleren van de scenario's.

Vervolgens is een referentie case gemaakt voor de droogte $T = 10$. Voor de periode 29 juli 2003 – 29 augustus 2003 is de in- en uitlaat van water in Malburgen benaderd. De cases die de maatregelen beschrijven, zijn naast de referentie case gelegd om te bepalen met hoeveel de in- en uitlaat van water toe- of afneemt in diezelfde periode.

Bovendien zijn de referentie case en de cases met de maatregelen doorgerekend voor een bui $T = 10 + 10\%$ en een bui $T = 100 + 10\%$ om te onderzoeken wat het effect van de maatregelen op de maximum peilstijging en de minimum drooglegging is.

Hieronder staat de onderbouwing voor parameters die veranderd zijn ten opzichte van het originele model van het waterschap Rivierenland.

Case: verificatie jaar 2003

Het Sobek model is zo ingesteld dat water efficiënt wordt in- en uitgelaten. Dit houdt in dat zoveel mogelijk de werkelijke situatie is aangehouden, maar dat door middel van stuwinstellingen en de plaatsing van twee fictieve pompstations een situatie is benaderd, waarbij efficiënter met water wordt omgesprongen. De resultaten van deze case zijn gebruikt als verificatiemiddel met de resultaten van het jaar 2003 die berekend zijn door het spreadsheetmodel.

Periode

Voor de verificatie case is het hele jaar 2003 doorgerekend. Daarbij is een inrekenperiode gebruikt van 1 maand op basis van de tijd die het grondwater nodig heeft om een evenwicht in te stellen.

Inrichting gebied

Er is in dit model uitgegaan van een totaal oppervlak van circa 400 hectare. Dit is meer dan in het spreadsheetmodel, omdat er ook verhard oppervlak buiten het projectgebied ligt, wat wel is aangesloten op het openwater van Malburgen.

Van het totaal oppervlak is circa 57% verhard wat is aangesloten op het oppervlaktewater, circa 39% onverhard en circa 4% open water.

Pompstations

Om te kunnen meten hoeveel water het gebied wordt ingelaten en om het watersysteem te laten voldoen aan de minimum oppervlaktewaterpeilen, zijn twee fictieve pompstation in het model geplaatst. De pompstations meten door middel van controllers de waterstanden op een locatie die gevoelig is voor lage waterstanden. De controller is zo ingesteld dat deze de opdracht geeft aan het pompstation om water het watersysteem in te pompen als een waterstand wordt gemeten, die onder het opgegeven minimumpeil van de controller ligt. Het opgegeven minimumpeil van de controller ligt hoger dan het officiële minimumpeil van het watersysteem om zo het pompstation de tijd te geven om op gang te komen en te voorkomen dat het officiële minimumpeil wordt onderschreden. De pompcapaciteit is uiteindelijk dusdanig ingesteld dat altijd aan de eisen van het officiële minimumpeil wordt voldaan gedurende een droogte T=10.

Stuwen

De stuwen zijn eveneens met controllers gestuurd. Opnieuw geldt dat over- of onderschrijden van het opgegeven peil van de controller, leidt tot het instellen van een bepaalde stuwhoogte. Er is uitgegaan van een hogere stuwhoogte in tijden van hoog water dan in tijden van laag water. In tijden van hoog water betekent dit dat niet direct al het water verloren gaat. Alleen de uitlaat stuw bij het Gelredome zal in tijden van hoog water veel water uitlaten door een stuwhoogte van 8,50 m + NAP. In tijden van droogte zijn de stuwen dusdanig laag ingesteld dat het watersysteem als één geheel werkt. Op deze manier zijn er geen grote verschillen in waterpeilen in het systeem en wordt enkel water het systeem ingepompt wat echt nodig is om het officiële minimumpeil te kunnen hanteren.

Onverhard oppervlak

Het oorspronkelijk model van het waterschap Rivierenland bevat drainage en infiltratie knopen om de situatie van het onverharde oppervlak te simuleren. In het Sobek model Malburgen is gekozen om knopen onverhard toe te voegen en de drainage en infiltratie knopen te verwijderen. Zo wordt inzichtelijker wat er op het onverharde oppervlak gebeurt. Aan het onverharde oppervlak is ook kwel en wegzijging gekoppeld. Voor de droogte T=10 zijn kwel en wegzijging waarden van het jaar 2003 gebruikt, die door het spreadsheetmodel berekend zijn over de deklaag. De oorspronkelijke knopen voor kwel en wegzijging zijn op non-actief gezet.

Watergangen

De watergang bij het Gelredome is op basis van veldwerk ingekort tot een B-watergang tussen knoop 57 en 3610. De watergang tussen knoop 1519 en knoop 323 is ook op basis van veldwerk verlegd. Aan het deel van de Arkelduiker wat bovengronds is gehaald, is een dwarsprofiel gehangen op basis van gegevens uit het veld. Tevens zijn de dwarsprofielen met knooppnummers: 102, 114, 115, 116, 117, 119, 120 toegevoegd aan het model.

Duikers

De ligging van de Arkelduiker is aangepast en een deel van de duiker is bovengronds gehaald om zo de werkelijke situatie te kunnen benaderen. De volgende duikers zijn op basis van veldwerk toegevoegd aan het model: 55, 58, 59, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 112, 113 en 118.

Case: referentie scenario

In het referentie scenario zijn de meeste instellingen van het verificatie jaar aangehouden. Er zijn drie referentie cases aangemaakt, namelijk voor een droogte T=10, een bui T= 10 + 10% en een bui T = 100 + 10%.

De inlaat van water is bepaald over de periode 29 juli 2003 tot en met 29 augustus 2003, als onderdeel van de droogte T = 10. Deze periode is geselecteerd omdat het waterpeil destijds onder de 8,70 meter + NAP lag. Dit is een randvoorwaarde voor het functioneren van het accoladeprofiel en het kunnen bepalen welk effect een accoladeprofiel heeft op de inlaat van water. Het accoladeprofiel leidt immers tot een verkleining van het oppervlak open water, maar dit geldt alleen als het waterpeil lager is dan de plasberm die op 8,70 meter + NAP ligt.

Rekenperiode

Voor de droogte $T=10$ is de periode 1 juni 2003 tot en met 31 oktober 2003 doorgerekend. Voor de bui $T = 10 + 10\%$ en $T = 100 + 10\%$ is geen inrekenperiode toegepast, aangezien de stuwen direct reageren op de peilstijging. Er is uitgegaan van een initieel waterpeil van 9 meter + NAP vlak voordat de buien beginnen.

Verdamping

De verdampingsgegevens van het jaar 2003 van het KNMI zijn gebruikt voor de droogte $T = 10$. Voor de bui $T = 10 + 10\%$ en $T = 100 + 10\%$ is de verdamping op nul gezet, aangezien de verdamping relatief klein is over zo een korte periode.

Kwel en wegzijging

De door het spreadsheetmodel berekende kwel en wegzijging zijn als tabel ingevoerd in de onverharde knopen gedurende de droogte $T=10$. Bovendien is er ook nog een vaste waarde voor wegzijging in de watergangen ingevoerd om zo de droogte $T=10$ na te kunnen bootsen. Deze vaste waarde betreft een gemiddelde van de wegzijging over de maanden juli en augustus in 2003. Deze waarde zit verwerkt in de verdampingsknoop voor open water. Voor de bui $T = 10 + 10\%$ en $T = 100 + 10\%$ zijn kwel en wegzijging op nul gezet, aangezien het een heel korte periode betreft en deze waardes daarom relatief weinig invloed hebben op de oppervlaktewaterstand.

Case: 10 centimeter minimumpeil verlaging

De eerste maatregel betreft een verlaging van het minimumpeil met 10 centimeter. Behalve de stuwen, worden de instellingen van het referentie scenario aangehouden. De maatregel is doorgerekend voor een droogte $T = 10$, een bui $T = 10 + 10\%$ en een bui $T = 100 + 10\%$.

Stuwen

De stuwhoogtes zijn, wanneer het opgegeven minimumpeil van de controller wordt onderschreden, met 10 centimeter verlaagd ten opzicht van het referentie scenario. Dit geldt alleen niet voor de stuw bij het Gelredome die het water uit het gebied laat. Dit betekent voor het overgrote deel van het gebied dat het waterpeil mag uitzakken naar 8,60 meter + NAP, maar in peilvak Bakenhof mag het waterpeil nu uitzakken naar 8,75 meter + NAP.

Case: 20 centimeter peilverlaging

De tweede maatregel is de verlaging van het minimumpeil met 20 centimeter. Uitgezonderd de stuwen zijn de instellingen van het referentie scenario aangehouden.

Stuwen

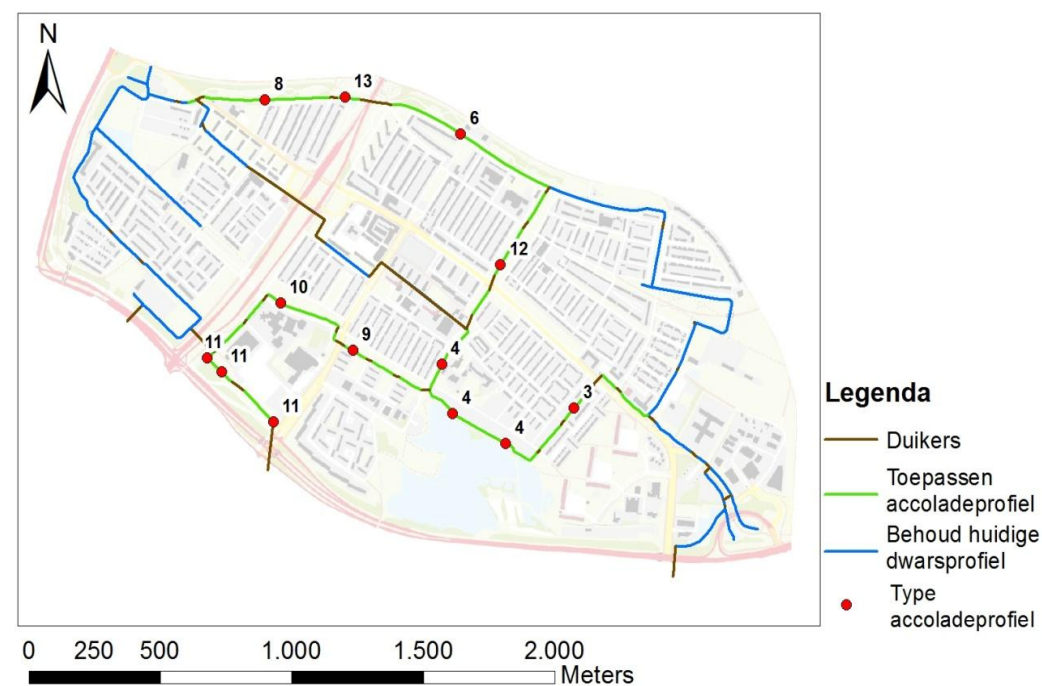
De stuwhoogtes, behalve de stuw bij het Gelredome, zijn ditmaal verlaagd met 20 centimeter, indien het opgegeven minimumpeil van de controller wordt onderschreden. In het grootste deel van Malburgen mag het water nu uitzakken naar 8,50 meter + NAP en in peilvak Bakenhof mag het water uitzakken naar 8,65 meter + NAP.

Case: accoladeprofiel

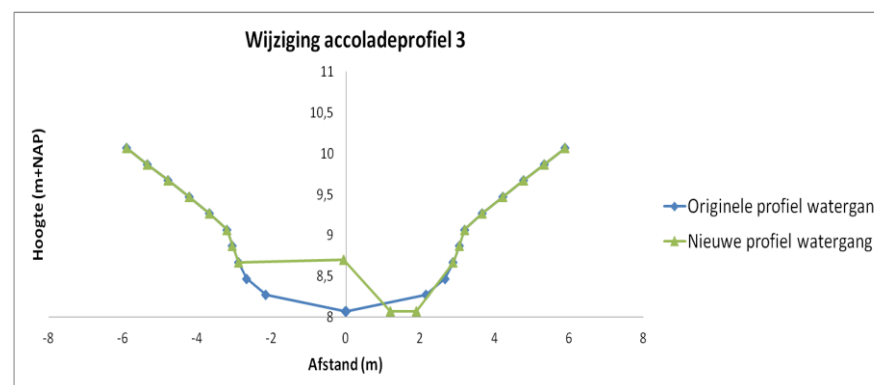
De derde maatregel is het toepassen van een accoladeprofiel in een deel van het projectgebied. Met uitzondering van het profiel van verscheidene watergangen, zijn opnieuw de instellingen van het referentie scenario aangehouden. De maatregel is doorgerekend voor een droogte $T = 10$, een bui $T = 10 + 10\%$ en een bui $T = 100 + 10\%$.

Profiel watergang

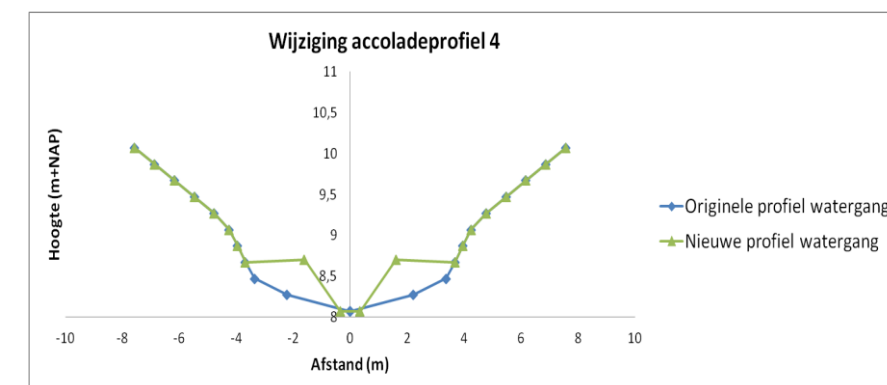
Er zijn in totaal 11 dwarsprofielen aangepast die één van de volgende accoladeprofiel nummers hebben gekregen: 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12 of 13. In figuur 38 is het type accoladeprofiel per locatie weergegeven. In de case accoladeprofiel van het Sobek model Malburgen zijn de locaties van de accoladeprofielen ook terug te vinden. In figuur 39 tot en met figuur 47 zijn de aanbevolen accoladeprofielen en de oorspronkelijke dwarsprofielen weergegeven.



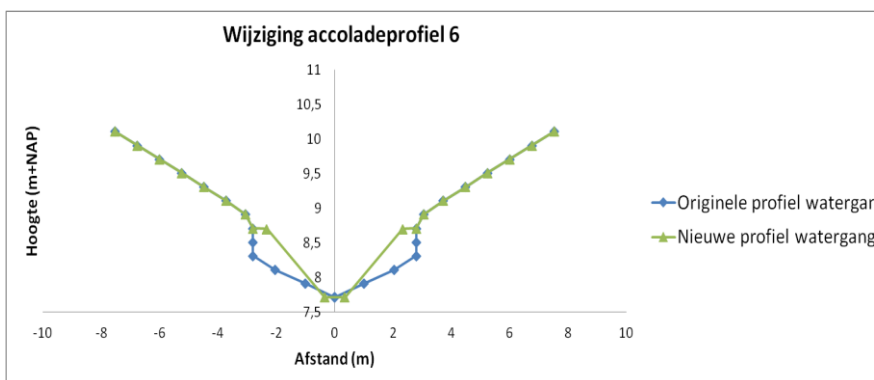
figuur 38: Type accoladeprofiel per locatie



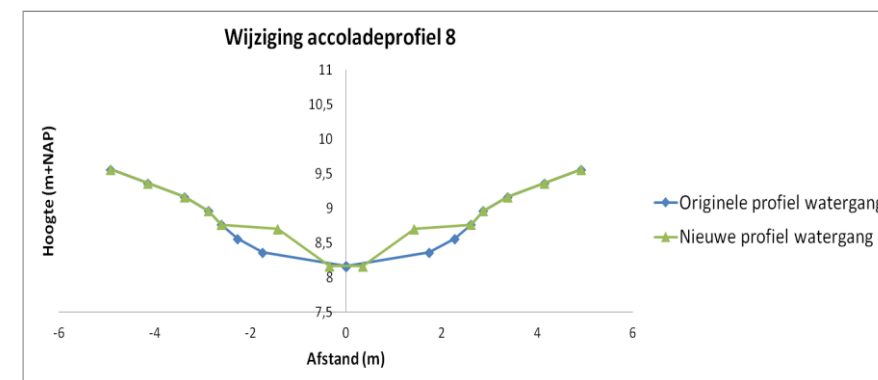
figuur 39: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 3



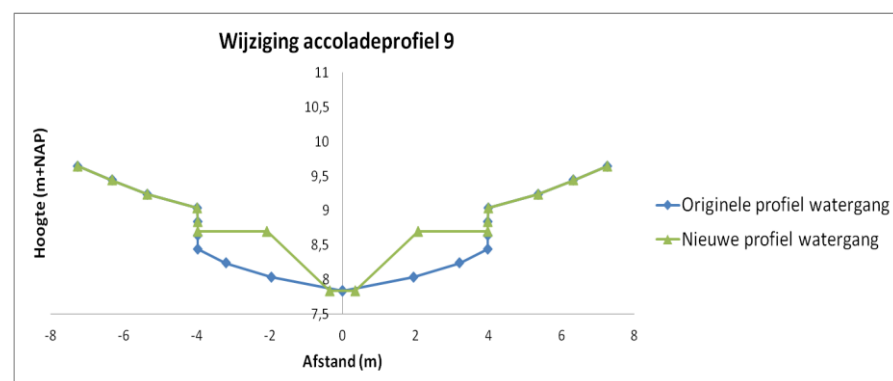
Figuur 40: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 4



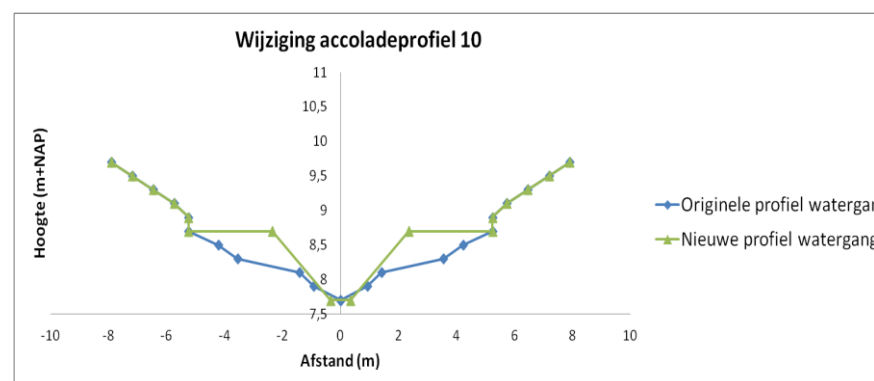
figuur 41: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 6



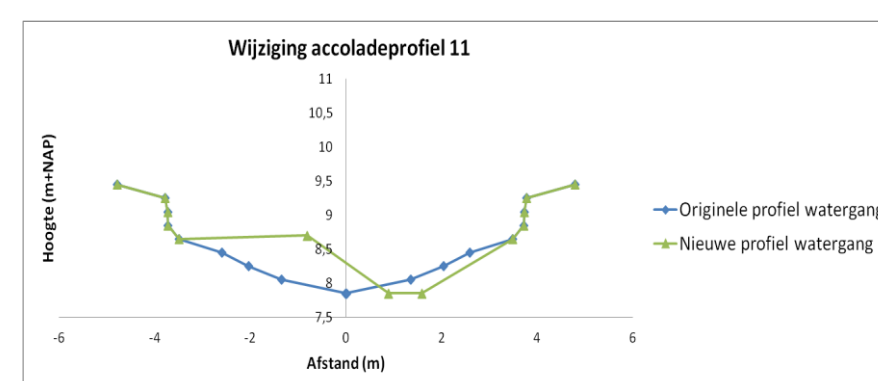
figuur 42: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 8



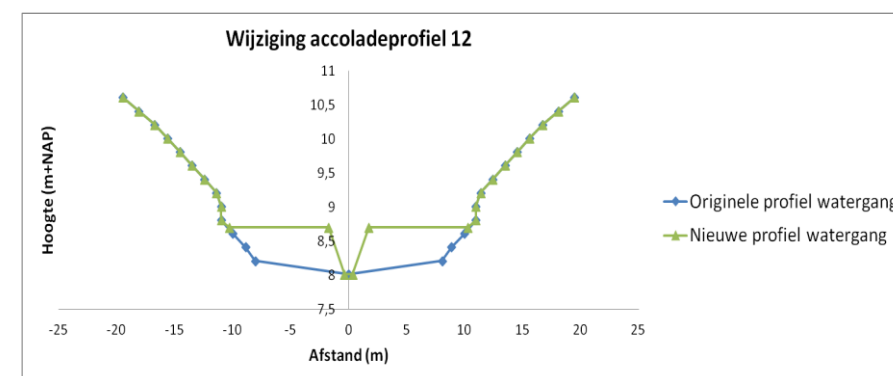
figuur 43: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 9



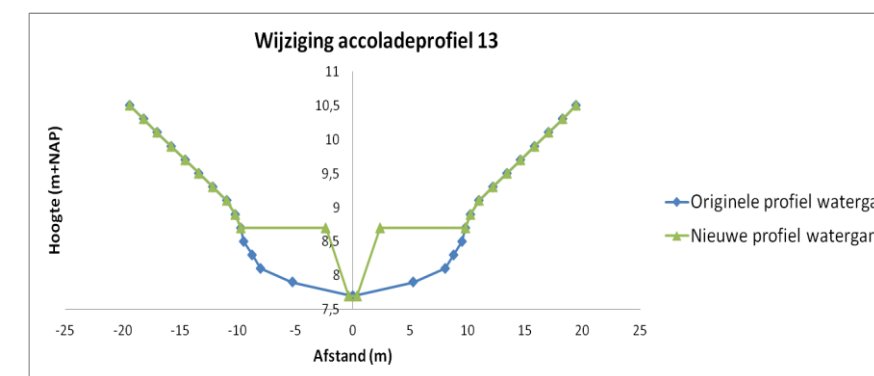
figuur 44: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 10



figuur 45: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 11



figuur 46: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 12



figuur 47: Oorspronkelijk profiel een aanbevolen accoladeprofiel 13

Case: accoladeprofiel en 10 centimeter minimumpeil verlaging

De vierde maatregel is het toepassen van accoladeprofielen in combinatie met 10 centimeter verlaging van het minimumpeil. Met uitzondering van een aantal dwarsprofielen, het oppervlak open water en de stuwhoogtes, zijn de instellingen van het referentie scenario aangehouden.

Dwarsprofiel

De accoladeprofielen van de case: accoladeprofiel zijn aangehouden.

Oppervlak open water

Door het accoladeprofiel neemt de verdamping en neerslag op openwater af. Aan de hand van het nieuwe profiel is berekend met hoeveel het oppervlak open water afneemt, wanneer het waterpeil lager is dan 8,70 meter. Dit is berekend door de nieuwe breedte met de lengte van de watergang te vermenigvuldigen. Wanneer het waterpeil onder 8,70 meter zakt, neemt het totaal oppervlak open water met 20% af, ten opzicht van de oorspronkelijke situatie. Deze vermindering in oppervlak open water is verdeeld over de verdampingsknopen: VDM_AFW665, VDM_AFW663, VDM_AFW679, 84 en over de neerslagknopen: NSL_AFW665, NSL_AFW663, NSL_AFW679 en 85.

Stuwen

De stuwhoogtes in Malburgen, met uitzondering van de uitlaat stuw bij het Gelredome, zijn met 10 centimeter verlaagd, indien een waterpeil wordt gemeten die onder het opgegeven waterpeil van de controller ligt. In het overgrote deel van Malburgen mag het waterpeil nu uitzakken naar 8,60 meter + NAP, maar in de Bakenhof mag het water zakken tot 8,75 meter + NAP

Case: accoladeprofiel en 20 centimeter minimumpeil verlaging

De vijfde en laatste maatregel is een combinatie van het accoladeprofiel met 20 centimeter verlaging van het minimumpeil. Met uitzondering van een aantal dwarsprofielen, het oppervlak open water en de stuwhoogtes, zijn de instellingen van het referentie scenario aangehouden.

Dwarsprofiel

De accoladeprofielen van case: accoladeprofiel zijn aangehouden.

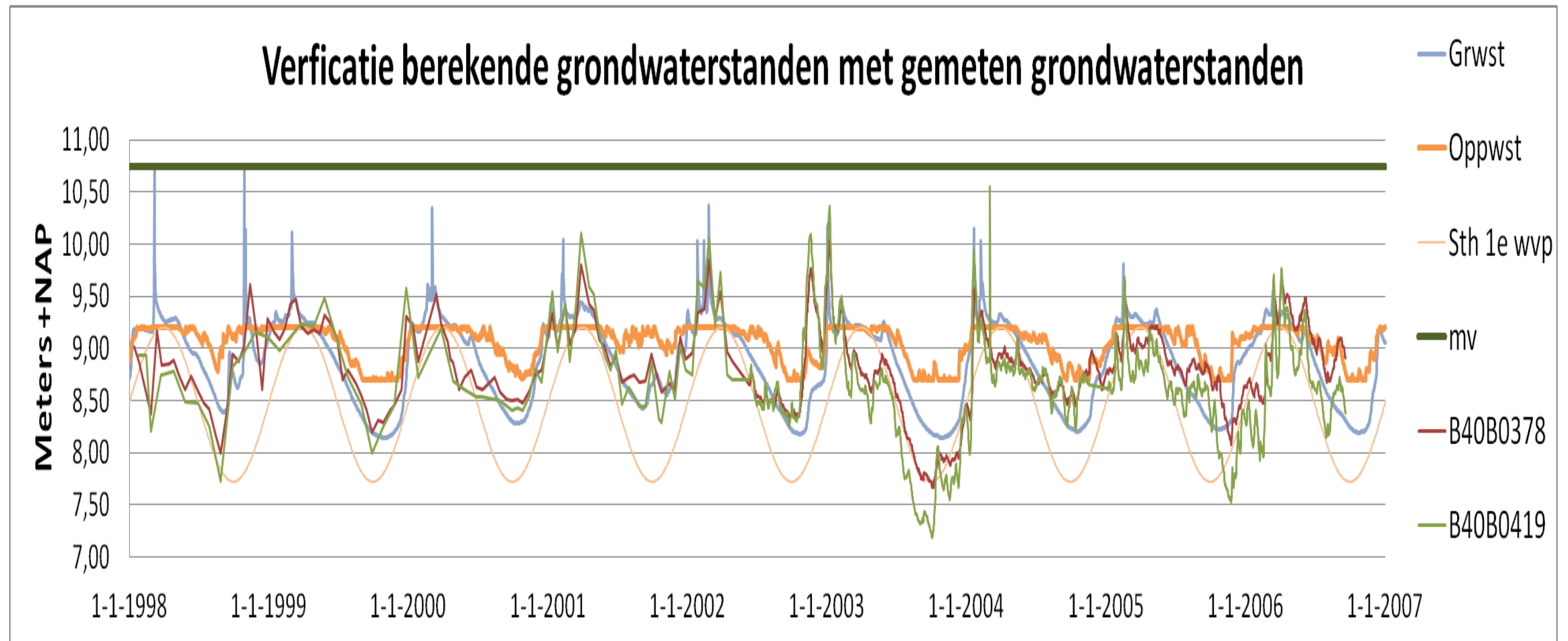
Oppervlak open water

Het oppervlak open water van de case: accoladeprofiel en 10 centimeter minimumpeil verlaging is aangehouden.

Stuwen

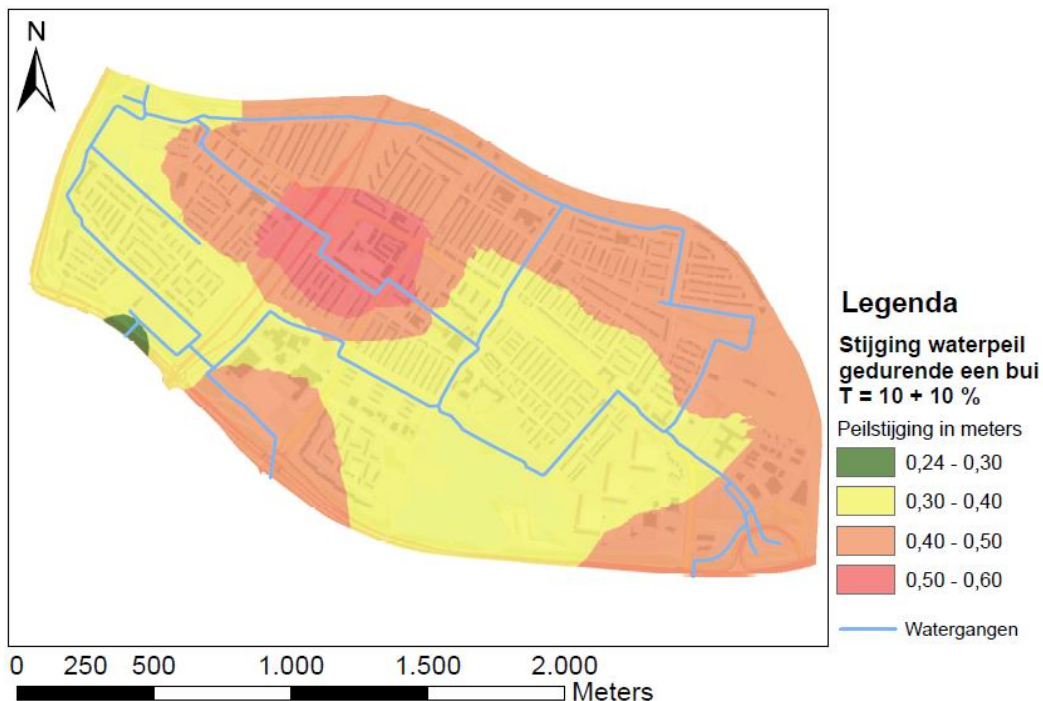
Met uitzondering van de stuw bij het Gelredome, worden de stuwhoogtes met 20 centimeter verlaagd ten opzichte van het referentie scenario. Dit is alleen van toepassing als het minimumpeil van de controller wordt onderschreden. Het waterpeil mag nu uitzakken naar 8,50 meter + NAP in het overgrote deel van Malburgen, maar in de Bakenhof is dit 8,65 meter + NAP.

Bijlage 5: Resultaten spreadsheetmodel en stijghoogtes uit DINOloket

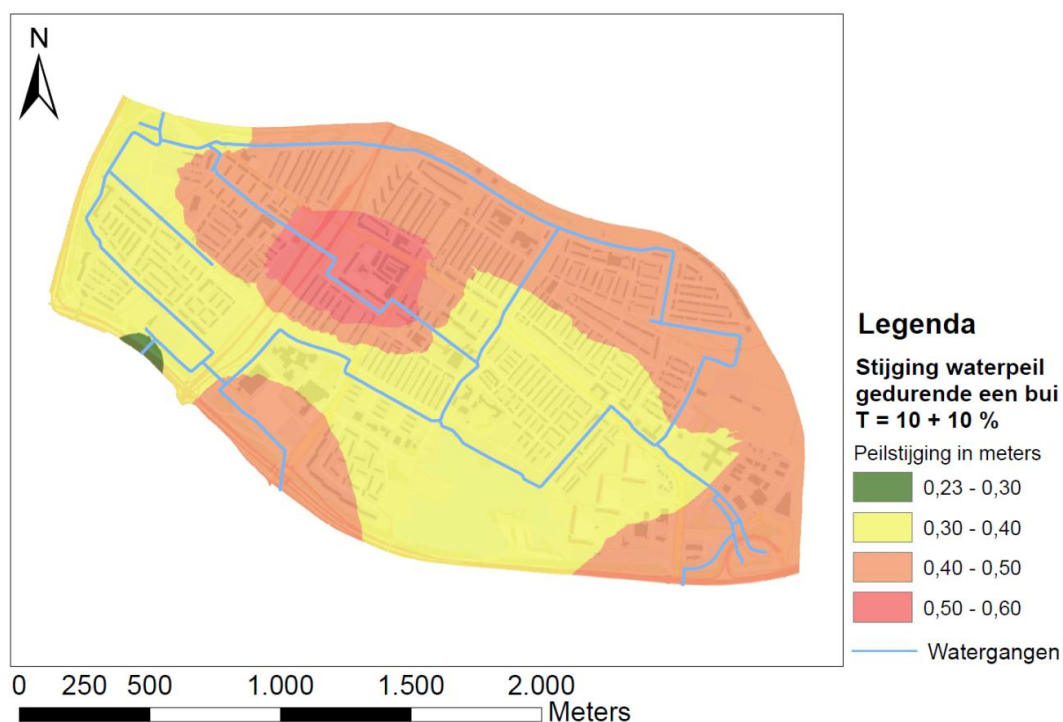


Bijlage 6: Maximum peilstijging gedurende bui $T = 10 + 10\%$

Maximum peilstijging in scenario met 10 centimeter verlaging van het minimumpeil



Maximum peilstijging in scenario met accoladeprofiel



Bronvermelding

De bronnen zijn in alfabetisch volgorde onder één van de volgende groepen geschaard: rapporten, boeken, websites of diversen.

Rapporten:

Broersma L.J., Maessen M. & Vermulst, C.J.W. (2006). *Diffuse bronnen in de dagelijkse praktijk*. Arnhem: Grontmij.

Bosch, J., Mey, E. de. & Weerd T. de. (2013). *Definitief ontwerp Waterrijk*. Arnhem: Veenenbos en Bosch Landschapsarchitecten.

Dienst Stadsbeheer, afdeling Openbare Ruimte. (2007). *Gemeentelijk Rioleringsplan 4, 2009-2013*. Arnhem: Gemeente Arnhem.

Dik, P. (2014). *Balans-2014*.

Elzerman, M. (2009). *Voorstel: vaststellen rapporage Arnhem 2009 -2015 inclusief uitvoeringsprogramma*. Waterschap Rivierenland.

Gemeente Arnhem (2009). *Waterplan Arnhem 2009 - 2015*. Arnhem: Gemeente Arnhem.

Gommers-Verbeek, L., Herpen, F.C.J. van., Krikken, A. & Olmer, I.M. (2012). *Gebiedsdossier Ir. H. Sijmons*. Aequator en Royal HaskoningDHV.

Grontmij. (2001). *Reconstructie sportpark De Bakenhof*. Arnhem.

Keunen L.J., Mulder, J.R. & Zwart, A.J.M. (2004). *In de ban van de Betuwse dijken, deel 5 Malburgen*. Wageningen: Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte.

Lamers, L., Loermans, J. & Smolders, F. (2012). *Effecten van flexibel peilbeheer op bodemprocessen en waterkwaliteit*. Nijmegen: B-WARE Research Centre.

Lohrman, R. (2012). *Uiterwaardvergraving Meinerswijk, geohydrologie en waterkwaliteit*. Deventer: Witteveen en Bos.

Massop, H. T. (2014). *Watersysteembeschrijving Overbetuwe*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.

Stowa. (2007). *Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de kaderrichtlijn water*. Stowa.

Waterschap Rivierenland. (2009). *Waterbeheerplan 2010-2015*. Waterschap Rivierenland.

Wee, T. H. van. (2012). *Toelichting op het GGOR/Streefpeilbesluit Over Betuwe inclusief beschrijving GGOR Over-Betuwe*. Deventer: Witteveen+Bos.

Witteveen en Bos. (2011). *Basisrioleringsplan Arnhem 2009-2019*. Witteveen en Bos.

Boeken:

Bot, B. (2011). *Grondwaterzakboekje*. Rotterdam: Bot Raadgevend Ingenieur.

Websites:

Algemeen Bestuur Waterschap Rivierenland. (2012). *Streefpeilbesluit Over-Betuwe*.

Opgeroepen van Overheid:

http://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/XHTMLoutput/Historie/Waterschap%20Rivierenland/273118/273118_1.html

Bladeren, C. van. (z.d.). *Zoewater/droogte*. Opgeroepen van Unie van Waterschappen:

<http://www.uvw.nl/thema/waterkwantiteit/zoetwaterdroogte/>

- Broersma, L. J. (2013). *Start proeftuin 'Kop van de Betuwe'*. Opgeroepen van Grontmij:
<http://www.grontmij.nl/MediaCenter/Nieuwsarchief/Pages/Start-proeftuin-Kop-van-de-Betuwe.aspx>
- Broersma, L.J. & Kramer, M.C.J. (2014). *Waterveiligheid in ruimtelijk perspectief*. Opgeroepen van Grontmij:
<http://www.grontmij.nl/MediaCenter/Nieuwsarchief/Documents/Waterveiligheid%20in%20Oruimtelijk%20perspectief.pdf>
- Buma, J., Ven, F. van de. & Vos, T. (2014). *Handreiking voor de uitvoering van een Stresstest Klimaatbestendigheid*. Opgeroepen van Ruimtelijke adaptatie:
http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/library/download/urn:uuid:cf3cc550-a321-47ce-98a4-9fe66831b0c5/handreiking_stresstest.pdf
- Deltacommissaris. (z.d.). *Deltabeslissing zoetwater - nieuw beleid, gezamenlijke aanpak*. Opgeroepen van Deltacommissaris:
<http://www.deltacommissaris.nl/documenten/videos/2015/02/20/deltabeslissing-zoetwater---nieuw-beleid-gezamenlijke-aanpak>
- DINOloket. (z.d.). *Ondergrondgegevens*. Opgeroepen van DINOloket:
<https://www.DINOloket.nl/ondergrondgegevens>
- Gemeente Arnhem. (2007^a). *Bestemmingsplan Malburgen - Oost*. Opgeroepen van Gemeente Arnhem:
http://www.arnhem.nl/ruimtelijkeplannen/plannen/NL.IMRO.02020000660-/NL.IMRO.02020000660-iv_NL.IMRO.02020000660-_art01.1.html
- Gemeente Arnhem. (2007^b). *Bestemmingsplan Malburgen-Midden*. Opgeroepen van Gemeente Arnhem:
http://www.geo.arnhem.nl/hyperlink/Bestemming/NL.IMRO.02020000659-/t_NL.IMRO.02020000659-.pdf
- Gemeente Arnhem. (z.d.). *Bestemmingsplan Arnhem Zuid-Oost*. Opgeroepen van Gemeente Arnhem:
http://www.arnhem.nl/ruimtelijkeplannen/plannen/NL.IMRO.0202.748-/NL.IMRO.0202.748-0201/t_NL.IMRO.0202.748-0201_4.4.html
- Helpdesk Water. (z.d.). *Besluit kwaliteitseisen en monitoring water 2009*. Opgeroepen van Helpdesk Water:
<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/handboek-water-0/wetgeving/waterwet/besluiten-regelingen/besluit-0/>
- Kennisportaal Ruimtelijke adaptatie. (z.d.). *Klimaat effecten Atlas*. Opgeroepen van Ruimtelijke Adaptatie:
<http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/klimaat effect atlas>
- Molster stedenbouw. (2013). *Proeftuin Kop van de Betuwe*. Opgeroepen van Molster stedenbouw:
<http://www.molster-stedenbouw.nl/ontwerp/21-betuwe/index.html>
- Nederlandse Encyclopedie (z.d.). *Begrip*. Opgeroepen van Nederlandse Encyclopedie:
<http://www.encyclo.nl/begrip/>
- Peek, T. J. (z.d.). *Nominatie Bodem van Gelderland*. Opgeroepen van Bodems:
<http://www.bodems.nl/nbv/lustrum/nominaties/Gelderland%20Bodem%20-%20Ooivaaggrond%20Jongmans%20&%20Peek.pdf>
- Regis II 2.1 (z.d.). *Ondergrondmodellen*. Opgeroepen van DINOloket:
<https://www.DINOloket.nl/ondergrondmodellen>

- Rijksoverheid. (z.d.). *Deltaprogramma: bescherming tegen overstromingen en zoetwatertekort*. Opgeroepen van Rijksoverheid:
<http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/deltaprogramma/deltaprogramma-bescherming-tegen-overstromingen-en-zoetwatertekort>
- Rijkswaterstaat. (z.d.). *Normen voor wateroverlast*. Opgeroepen van Rijkswaterstaat:
<http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/handboek-water/thema's/wateroverlast-0/normen-wateroverlast/>
- Stowa. (z.d.). *Stichting toegepast onderzoek waterbeheer*. Opgeroepen van Stowa:
<http://www.stowa.nl/>
- Synbiosys. (2015). *Natura2000 kaart*. Opgeroepen van Synbiosys:
<http://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/googlemapszoek.aspx>
- Waddenzee. (z.d.). *Vierde Nota Waterhuishouding*. Opgeroepen van Waddenzee:
http://www.waddenzee.nl/Vierde_Nota_Waterhuishouding.983.0.html
- Wageningen Universiteit (z.d.). *Parameters Grondwaterdynamiek*. Opgeroepen van Wageningen UR:
<http://www.wageningenur.nl/nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/Alterra/Faciliteiten-Producten/Software-en-modellen/Grondwaterdynamiek/Parameters.htm>
- Waterbase. (z.d.). *Waterbase*. Opgeroepen van Rijkswaterstaat:
http://live.waterbase.nl/waterbase_dbh.cfm?loc=DRIELBVN&page=start.locaties.databe-schikbaarheid&taal=nl&loc=&wbwns=1%7CWaterhoogte+in+cm+t.o.v.+normaal+amsterdams+peil+in+oppervlaktewater&whichform=2
- Waterschap Rivierenland. (2002). *Integraal Waterbeheersplan Gelders Rivierengebied 2002 – 2006*. Opgeroepen van waterschap Rivierenland:
<http://www.waterschaprivierenland.nl/cvdr/272014/Integraal+Waterbeheersplan+Gelders+Rivierengebied+2002-2006.html>
- Waterschap Rivierenland. (2006). *Beleidsregels Keur voor waterkeringen en wateren van Waterschap Rivierenland*. Opgeroepen van de centrale regelgeving overheid:
http://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/xhtmloutput/historie/Waterschap%20Rivierenland/271434/271434_1.html
- Waterschap Rivierenland. (2012). *Kaart waterkwaliteit*. Opgeroepen van waterschap Rivierenland: <http://www.waterschaprivierenland.nl/common/over-het-waterschap/taken/schoon-water/kaart-waterkwaliteit.html>
- Waterschap Rivierenland. (2014). *Beleidsregels behorende bij de Keur Waterschap Rivierenland 2014*. Opgeroepen van Overheid:
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/wsb-2014-8740.html>
- Waterschap Rivierenland. (z.d.^a). *Kaart waterpeilen*. Opgeroepen van waterschap rivierenland:
<http://www.waterschaprivierenland.nl/common/over-het-waterschap/taken/voldoende-water/kaart-waterpeilen.html>
- Waterschap Rivierenland. (z.d.^c). *Watertoets*. Opgeroepen van waterschap Rivierenland:
<http://www.waterschaprivierenland.nl/common/regelen-en-aanvragen/watertoets/watertoets.html>
- Waterschap Rivierenland. (z.d.^d). *Waterberging*. Opgeroepen van waterschap Rivierenland:
<http://www.waterschaprivierenland.nl/common/regelen-en-aanvragen/watertoets/waterberging.html>

Waterschap Vallei en Veluwe. (z.d.). *Wat is een C-watergang?* Opgeroepen van waterschap Vallei en Veluwe:
<http://www.vallei-veluwe.nl/water-0/waterbeheer/nieuw-abc/vraag-antwoord-0/vragen-antwoorden/watergang-1/>

Diversen:

Bos, R. (2015, 02 20). Interview duurzame en klimaatbestendige herinrichting Malburgen.
(F. Jansen, Interviewer)

CBS, Nationaal Georegister & PDOK. (2014). *PDOK CBS Bestand Bodemgebruik 2010 van het CBS - WMS*.

Drost, T. (2014). *Powerpoint presentatie voorraadvorming zoetwater 2014*. Waterschap Rivierenland.

Esri Nederland, PDOK, Provincies, Rijkswaterstaat & Waterschapshuis (2014). *AHN2 – overzicht kaartbladen*.

Kadaster, RUG Geodienst (2014). *TOP10NL*.

PDOK. (2012). *PDOK Cultuurhistorisch GIS (CultGIS) - WMS*. PDOK, Nationaal Georegister.

Waterschap Rivierenland. (2013). *Watersysteem kaart*.

Waterschap Rivierenland. (z.d.). *Sobek model van waterschap Rivierenland*.

Waterschap Rivierenland. (z.d.^b). *Legger gegevens waterbeheergebied waterschap Rivierenland*.