

Hittestress in de bodem

Het effect van klimaatverandering en hittestress op de
bodemfuncties



Leeropdracht van Hogeschool Van Hall Larenstein
Trefwoorden: hittestress, klimaatverandering, bodemopwarming, bodemfuncties
Auteurs: Pieter Mantel en Roel Gevers

HITTESTRESS IN DE BODEM

Kwantitatief onderzoek naar de effecten op de bodemfuncties als gevolg van bodemopwarming door klimaatverandering en hittestress.



Soort: Bachelor scriptie
Status: Definitief
Versie: 2.0

Auteurs:	Pieter Mantel	Roel Gevers
Studentnummer:	930925004	000003297
E.:	Pietermantel@hotmail.nl	Roel_Gevers@hotmail.com
T.:	+31622886310	+31614935222

Hogeschool: Van Hall Larenstein
Opleiding: Land- en Watermanagement
Major: Grond Weg en Waterbouw

Interne begeleider: Dan Assendorp
E.: Dan.Assendorp@hvhl.nl
T.: +31263695805

Afstudeerbedrijf: Sweco Nederland B.V.
Externe begeleider: Paul Oude Boerrigter
E.: Paul.OudeBoerrigter@sweco.nl
T.: +31620609559

Datum: 31 mei 2017

VOORWOORD

Voor u ligt de afstudeerscriptie 'Hittestress in de bodem'. Het betreft een onderzoek naar de opwarming van de bodem als gevolg van hittestress en klimaatverandering, en de effecten hiervan op de bodemfuncties. Deze afstudeerscriptie is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Land- en Watermanagement aan Hogeschool Van Hall Larenstein te Velp. Het onderzoek is gedaan in opdracht van Sweco Nederland en is uitgevoerd in de periode van februari 2017 tot en met juli 2017. Wij willen Sweco hartelijk bedanken voor mogelijkheid om hier af te studeren.

Bij deze willen wij ook graag onze externe begeleider Paul Oude Boerrigter bedanken voor de fijne begeleiding tijdens het afstudeertraject, de derde partijen waar hij ons mee in contact heeft gebracht en de inhoudelijke hulp die hij ons heeft geboden. Verder zijn we met een aantal vragen bij collega's van verschillende afdelingen geweest, zij hebben zich altijd erg behulpzaam opgesteld en willen wij dan ook bedanken. Daarnaast willen wij onze interne begeleider Dan Assendorp bedanken voor de hulp bij het aanbrengen van structuur in het onderzoek.

Tot slot willen wij twee partijen specifiek bedanken. Als eerst Ton Denters van het Ingenieursbureau van de gemeente Amsterdam voor het aanleveren van een casusgebied met bijbehorende informatie. Ten tweede Claudia Agudelo-Vera van het KWR Watercycle Research Institute voor het beschikbaar stellen van het gebruikte model en haar hulp tijdens het toepassen van dit model.

Wij wensen u veel leesplezier toe!

Pieter Mantel en Roel Gevers

Houten, mei 2017

SAMENVATTING

Er is nog relatief weinig bekend over de opwarming van de bodem in stedelijk gebied. De standaard temperatuur van de bodem bedraagt 11 °C. In hoeverre deze bodemtemperatuur verandert tijdens warme periodes is niet bekend.

Het doel van dit onderzoek is om meer inzicht te krijgen in de mate van hittestress en klimaatverandering in het stedelijk gebied, de hieraan gekoppelde bodemopwarming en de gevolgen hiervan op de verschillende bodemfuncties. Om dit doel te behalen is de volgende hoofdvraag opgesteld: *“Welke effecten ondervinden de verschillende bodemfuncties in stedelijk gebied, door opwarming van de bodem als gevolg van klimaatverandering en hittestress?”*. In het onderzoek wordt de Spaarndammerbuurt te Amsterdam als casusgebied gebruikt en is onderscheid gemaakt tussen het huidige klimaat en het toekomstig klimaat.

Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag zijn verschillende methoden gebruikt. Zo zijn via het KNMI de verwachte klimaatscenario's achterhaald. Voor het vaststellen van hittestress wordt de hittestress-module van Tygron gebruikt. Deze module genereert aan de hand van online open-data een kaart waarin de mate van hittestress duidelijk wordt. Het berekenen van temperatuur in de bodem wordt gedaan middels het bodem-model. Deze genereert met behulp van klimaatgegevens, lokale gebiedseigenschappen en bodemeigenschappen voor iedere halve meter min maaiveld de daggemiddelde bodemtemperatuur. Door dit voor de onderzoekpunten in het casusgebied en verschillende klimaatscenario's door te rekenen wordt meer inzicht verkregen over bodemopwarming.

De gehele theorie achter de berekening van het bodem-model wordt verklaard uit de 'oppervlakte energiebalans'. Hieruit blijkt dat niet alleen hittestress en klimaatverandering, maar ook antropogene activiteiten en oppervlakgebruiken een rol spelen bij het opwarmen van de stad en daarmee de opwarming van de bodem.

De resultaten uit het model laten zien dat de bodem bij groene oppervlakken minder snel opwarmt dan bij de bodems onder verharde oppervlakken. Ook laten de uitkomsten zien dat de bodem dient als warmtebuffer. De opgenomen warmte wordt pas in een later stadium weer afgegeven. Tot slot tonen de resultaten dat deze patronen tot het jaar 2050 hetzelfde blijven, maar dat de bodemtemperatuur enkele graden zal toenemen. Deze stijging in bodemtemperatuur zal ervoor zorgen dat enkele bodemfuncties in de toekomst meer effecten zullen ondervinden.

Het onderzoek toont aan dat de bodemfuncties kabels, leidingen en rioleringen, voorraad grondwater en archeologische waarde negatieve effecten zullen ondervinden. Gewasproductie, schone en veilige bodem en levende bodem ondervinden juist positieve effecten als gevolg van bodemopwarming.

Voornaamste conclusie is dat een verandering in bodemfunctie voorraad grondwater, die gelijk is aan de grondwaterstand, veel invloed heeft op andere bodemfuncties. De opwarming van de bodem zal in toekomst de grondwaterstand doen dalen. Door deze daling ondervinden de bodemfuncties draagkracht om te bouwen, gewasproductie, archeologische waarde, ecologische diversiteit, levende bodem, stabiele bodem, waterbergende bodem en koolstofbindende bodem negatieve effecten. Dit betekent dat er met het oog op de toekomstige opwarming van de bodem in stedelijk gebied extra aandacht besteed moet worden aan het monitoren en reguleren van het grondwater.

INHOUDSOPGAVE

Verklarende woordenlijst.....	1
1 Inleiding.....	3
1.1 Aanleiding.....	3
1.2 Casusgebied.....	4
1.3 Probleemdefinitie.....	4
1.4 Doelstelling.....	5
1.5 Onderzoeksvragen.....	5
1.5.1 Hoofdvraag.....	5
1.5.2 Deelvragen.....	5
1.6 Leeswijzer	5
2 Theoretisch kader.....	6
2.1 Hittestress	6
2.1.1 Definities.....	6
2.1.2 Modellen	6
2.1.3 Hittestress-module.....	7
2.2 Opwarming van de bodem.....	8
2.2.1 Definities.....	8
2.2.2 Modellen	9
2.3 Oppervlakte energiebalans	9
2.3.1 Netto straling (Q_s)	10
2.3.2 Antropogene warmte (Q_f).....	11
2.3.3 Bodem warmteflux (G)	11
2.3.4 Turbulente warmtefluxen ($H + L_vE$)	11
2.3.5 Het hitte-eilandeffect	11
2.4 Bodemeigenschappen	11
2.5 Bodemfuncties	12
3 Methode.....	13
4 Toepassing en resultaten	15
4.1 Casusgebied.....	15
4.1.1 Oppervlakgebruiken	15
4.1.2 Hittestress.....	17

4.1.3.	Onderzoekpunten.....	17
4.2.	Invoerparameters bodem-model	18
4.2.1.	Weergegevens	18
4.2.2.	Bodemeigenschappen	18
4.2.3.	Lokale gebiedseigenschappen	19
4.2.4.	Overzicht parameters	20
4.3.	Verandering in bodemtemperatuur	21
4.3.1.	Temperatuurverloop bodemdiepten	21
4.3.2.	Warmteverloop extremen oppervlakgebruiken	24
4.3.3.	Temperatuurverschil 2006 en 2050	25
4.3.4.	Overzichtstabel bodemtemperaturen.....	27
4.4.	Effecten van bodemopwarming op de bodemfuncties.....	28
4.4.1.	Bodemfuncties.....	28
4.4.2.	Bodemfuncties in de Spaarndammerbuurt.....	30
4.4.3.	Effecten op de bodemfuncties	30
5.	Slotstuk.....	38
5.1.	Conclusie	38
5.2.	Discussie	39
5.3.	Aanbeveling.....	40
	Reflectie.....	41
	Literatuurlijst	42
	Bijlagen	45

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Albedo:	Dit is de hoeveelheid zonnestraling dat wordt teruggekaatst door een oppervlak. Hoe hoger het albedo hoe meer straling er direct weerkaatst wordt.
Bodemfuncties:	Dit zijn alle gebruiken onder het maaiveld. Een overzicht met de bodemfuncties die worden onderzocht zijn te vinden in bijlage 1.
Bodem-model:	Een door het KWR ontwikkeld model waarmee voor verschillende weersomstandigheden (bijv. op basis van historische reeksen van het KNMI) en verschillende bodemtypes en bodembedekking (bijv. op basis van geografische informatie uit de bodemkaart Nederland) een uitspraak gedaan worden over de indringing van warmte in de bodem.
Convectie:	Het verschijnsel hoe warmte zich verticaal voortplant door een vloeistof.
Emissiviteit:	Geeft de mate weer waarin een oppervlak straling die het ontvangen heeft, vasthoudt en vervolgens uitstraalt. Een hoge emissiviteit zorgt voor meer opwarming.
Hitte-eilandeffect:	Dit is het fenomeen dat de luchttemperatuur in het stedelijk gebied hoger is dan in het omliggende landelijk gebied. Het temperatuurverschil kan tot 8 °C hoger oplopen. Dit wordt ook wel het hittestress genoemd.
Hittestress:	Dit is het fenomeen dat de luchttemperatuur in het stedelijk gebied hoger is dan in het omliggende landelijk gebied. Het temperatuurverschil kan tot 8 °C hoger oplopen. Dit wordt ook wel het hitte-eilandeffect genoemd.
Hittestress-module:	Een model van UNESCO dat in de Tygron Engine wordt gesimuleerd. De software is GIS gerelateerd en maakt gebruik van online open data.
Interactie:	Is een wisselwerking tussen mensen, dieren of dingen.
Kinetische energie:	Ook wel bewegingsenergie genoemd. Dit is de energie die een lichaam ondervindt door beweging.
Klimaatadaptatie:	Is het aanpassen aan klimaatverandering. Door dit proces is de samenleving minder kwetsbaar en kan er geprofiteerd worden van de kansen die klimaatveranderingen bieden.
Klimaatscenario's:	De KNMI'14 klimaatscenario's zijn klimaatscenario's opgesteld door het KNMI. In dit onderzoek wordt uit gegaan van het meest extreme klimaatscenario W _H .
KNMI:	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut is het nationaal referentie-instituut voor weer, klimaat en seismologie.
KWR:	Is een onderzoeksinstituut voor de Nederlandse drinkwatersector.
Matlab:	Is een technisch softwareomgeving uitgegeven door The Mathworks en wordt gebruikt in zowel de industrie als in de academische wereld voor allerlei wiskundige toepassingen.
Niet verhardingen:	Oppervlakken in de openbare ruimte die 'groen' zijn ingericht.

Organische-verontreiniging	Verontreinigingen in de bodem die meestal bestaan uit ketens van koolstof. Deze verontreiniging zijn meestal apolair en slecht of niet oplosbaar in water. Het gedrag van de verontreiniging is afhankelijk van de structuur.
Thermische bodemeigenschappen:	Eigenschappen van de bodem die een rol spelen bij het opwarmen en afkoelen van de desbetreffende bodem.
TNO:	De Nederlandse Organisatie voor toegepaste-natuurwetenschappelijk onderzoek is een onderzoeksinstituut met als doelstelling het in opdracht van overheden en andere marktpartijen toepassen van wetenschappelijke kennis in de praktijk.
Tygron:	Is een softwareontwikkelingsbedrijf. Gericht op het klimaatadaptief maken van steden heeft de firma de Tygron Engine ontwikkeld.
Verharding:	Oppervlakken van het maaiveld die zijn voorzien van harde elementen zoals steen, asfalt of beton.
Waternet:	Is een Nederlands overheidsbedrijf wat zich bezighoudt met drinkwatervoorzieningen, riolering en waterbeer. Waternet is verantwoordelijk voor alle waterzaken van de gemeente Amsterdam.
Wortel zone:	De grondlaag waarin de levende wortels van een vegetatie aanwezig zijn. Meestal is dit de laag waarin het overgrote deel van de wortels zich bevindt.
<:	Kleiner dan
>:	Groter dan

1 INLEIDING

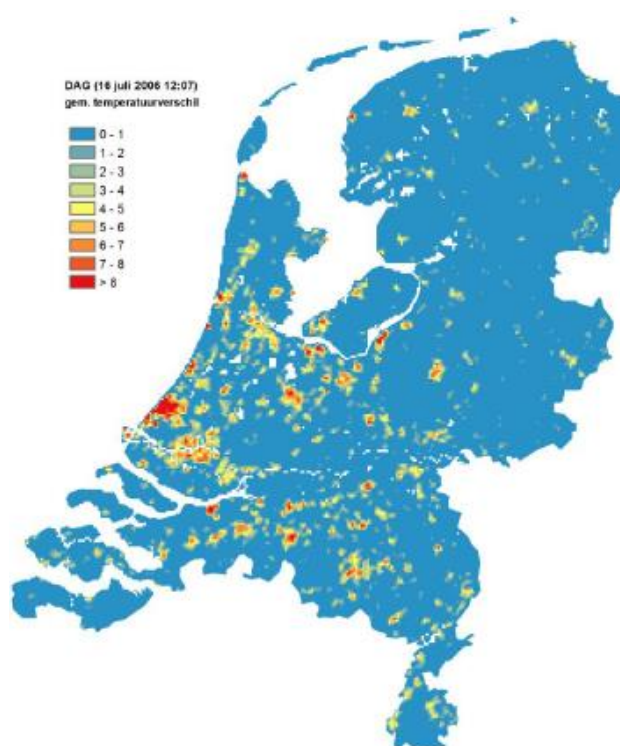
In dit hoofdstuk wordt het onderzoek naar de opwarming van de bodem, als gevolg van klimaatverandering en hittestress, en de effecten hiervan op de verschillende bodemfuncties ingeleid. Aan bod komen de aanleiding, het casusgebied, de probleem- en doelstelling en de onderzoeksvragen. Tot slot is er met een leeswijzer aangegeven wat er in de rest van dit onderzoeksrapport wordt behandeld.

1.1 AANLEIDING

In de afgelopen jaren is er tal van onderzoek gedaan naar klimaatverandering. Door het veranderen van het klimaat stijgt onder andere de temperatuur op aarde. Wetenschappers zijn het er grotendeels over eens dat de mens een belangrijke rol speelt in deze opwarming. De verandering van het klimaat is vandaag de dag voelbaar, zichtbaar en meetbaar. De grotere steden ondervinden hier hinder van in de vorm van vier problemen, namelijk verdroging, wateroverlast, waterveiligheid en hittestress. Binnen de ingenieursbureaus komt dan ook steeds meer vraag naar hoe steden klimaat adaptief in te richten zodat er zo min mogelijk hinder wordt ondervonden door klimaatveranderingen. Binnen dit onderzoek ligt de focus op het probleem hittestress.

Met hittestress wordt bedoeld dat de temperatuur in het stedelijk gebied hoger is dan in het omliggend landelijk gebied. De zomers worden steeds warmer en het aantal tropische dagen neemt toe. Dit heeft een versterkende werking op het fenomeen hittestress, ook wel het hitte-eilandeffect genoemd. In Figuur 1 is een satellietbeeld te zien van een hittegolf uit het jaar 2006. De grotere steden zijn duidelijk terug te vinden in de figuur in de vorm van gele en rode vlekken. De kleurverschillen duiden op het temperatuurverschil met het omliggend landelijk gebied, wat tot wel acht graden Celsius kan oplopen (Klok, Schaminée, Duyzer, & Steeneveld, 2012).

De afgelopen jaren is er relatief veel onderzoek gedaan naar hittestress en de gevolgen die dit met zich meebrengt. Hittestress wordt hoofdzakelijk veroorzaakt doordat straling, afkomstig van zonlicht, langer wordt vastgehouden en langzamer wordt afgestaan door verharde elementen. Dit effect wordt versterkt door de aanwezigheid van donkere materialen, lagere windsnelheden en een hogere bevolkingsdichtheid (Nijhuis, 2011). Hittestress leidt tijdens een hittegolf tot 12% meer doden, wat gelijk staat aan 40 sterfgevallen per dag. Verder nemen de ziektecijfers toe, wordt de arbeidsproductiviteit lager en is er meer agressie (Consortium, 2011). Deze extra opwarming heeft in het stedelijk gebied heeft niet alleen effect op de mens, ook de bodem ondervindt hier mogelijk effecten van.



Figuur 1: Temperatuurverschillen tussen het stedelijk- en landelijk gebied. Satellietbeelden van 16 juli 2006. (Klok, Schaminée, Duyzer, & Steeneveld, 2012)

De eerste twee meter onder maaiveld, de bodem, heeft vele functies, zie Bijlage 1: Bodemfuncties. De functies zijn te verdelen in vier hoofdfuncties, namelijk: draag-, productie-, regulatie- en informatieve functies. De bodem in de stad heeft een gemiddelde temperatuur van elf graden Celsius. De bodemfuncties functioneren naar behoren bij deze temperatuur. Er is echter nog weinig bekend over het functioneren van deze functies bij eventuele stijgingen van de bodemtemperatuur als gevolg van klimaatverandering en hittestress.

In dit onderzoek wordt de koppeling gelegd tussen het opwarmen van de bodem als gevolg van hittestress en klimaatverandering, en het effect wat dit heeft op de verschillende bodemfuncties. De koppeling wordt gelegd met behulp van het bodem-model. Dit model is ontwikkeld door het KWR, een onderzoeksinstituut voor de Nederlandse drinkwatersector. Hiermee kan de warmteafgifte in de bodem bepaald worden. Met behulp van klimaatgegevens en specifieke gebieds- en bodemeigenschappen kan voor iedere bodem de warmteafgifte op een bepaalde diepte berekend worden (Molen M. v., Pieterse-Quirijns, Donocik, & Smulders, 2009).

1.2 CASUSGEBIED

Aan het onderzoek wordt een praktische toepassing toegevoegd in de vorm van een casusgebied. Dit is gedaan om het onderzoek geen theoretisch bolwerk te laten worden, maar het iets tastbaars te laten zijn. Het casusgebied is gekozen in samenspraak met het Ingenieursbureau van de gemeente Amsterdam (IBA). IBA heeft aangegeven dat er hittestress optreedt in dit casusgebied. Dit maakt het casusgebied relevant voor dit onderzoek.

Het casusgebied betreft de Spaarndammerbuurt, die ten noordwesten van het centrum van Amsterdam is gelegen, zie Figuur 2. In het gebied bevinden zich onder andere het Westerpark, de Staatslieden-, Zeehelden- en de Frederik Hendrikbuurt en centraal in het gebied bevindt zich een bedrijventerrein van NedTrain.



Figuur 2: Situering casusgebied, voor originele kaart zie Bijlage 2: Situering casusgebied.

1.3 PROBLEEMDEFINITIE

Er is relatief weinig bekend over de effecten die bodemfuncties ondervinden door de opwarming van de bodem als gevolg van klimaatverandering en hittestress. De bodemopwarming in stedelijk gebied wordt versterkt door hittestress, en in de nabije toekomst door het veranderende klimaat. Zo bestaat de kans dat bodemfuncties niet meer naar behoren gaan functioneren. Om hier voor een specifiek gebied een uitspraak over te kunnen doen moet er meer inzicht in dit probleem worden verkregen.

1.4 DOELSTELLING

Het doel van dit onderzoek is om voor een specifiek stedelijk gebied meer inzicht te krijgen in de mate van klimaatverandering en hittestress, de hieraan gekoppelde opwarming van de bodem, en de gevolgen hiervan op de verschillende bodemfuncties.

1.5 ONDERZOEKSVRAGEN

Om structuur aan te brengen in het onderzoek wordt er gewerkt aan de hand van een hoofdvraag die verder is opgesplitst in deelvragen. Door antwoorden te vinden op de deelvragen zal uiteindelijk een antwoord ontstaan voor de hoofdvraag.

1.5.1 Hoofdvraag

De centrale vraag in dit rapport luidt als volgt:

“Welke effecten ondervinden de bodemfuncties in stedelijk gebied, door opwarming van de bodem als gevolg van klimaatverandering en hittestress?”

1.5.2 Deelvragen

Deze centrale vraag wordt beantwoord aan de hand van onderstaande deelvragen.

- *In welke mate treedt er hittestress op in het casusgebied en welke onderzoeklocaties kunnen hieraan gekoppeld worden?*
- *Welke klimaatgegevens, die betrekking hebben op de opwarming van stedelijk gebied, veranderen er in de toekomst en in welke mate veranderen deze?*
- *Welke gegevens zijn er benodigd voor het bodem-model, en welke variabele waarden zijn hieraan gekoppeld voor de verschillende onderzoeklocaties?*
- *Hoe verloopt het proces van bodemopwarming op de onderzoeklocaties voor de huidige en toekomstige situatie?*
- *Welke bodemfuncties zijn er aanwezig in het casusgebied, en aan welke onderzoekpunten zijn deze gekoppeld?*
- *In welke mate heeft de bodemopwarming gevolgen voor de bodemfuncties in het casusgebied?*

1.6 LEESWIJZER

Het onderzoek wordt in hoofdstuk 1 ingeleid. Hierin komen onder andere de probleem- en doelstelling en de onderzoeksvragen aanbod. Vervolgens wordt in hoofdstuk 2 het theoretisch kader toegelicht. Hierin wordt een wetenschappelijke en betrouwbare basis gelegd voor het onderzoek. Dit wordt opgevolgd door hoofdstuk 3, de methode. Hierin wordt per deelvraag de toegepaste methode toegelicht. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 het casusgebied toegelicht, worden de invoerparameters voor het bodem-model verzameld, het temperatuurverloop in de bodem verwoordt en worden effecten op de bodemfuncties uitgewerkt. Als laatste volgt hoofdstuk 5. Hierin wordt een conclusie, discussie en een aanbeveling gegeven.

2 THEORETISCH KADER

Dit hoofdstuk geeft een theoretische basis voor het onderzoek. Voor ieder onderwerp in het onderzoek worden verschillende definities vergeleken. Waar mogelijk worden ook verschillende modellen tegen elkaar afgewogen. Als eerste wordt het onderwerp hittestress uitvoerig behandeld waarna de opwarming van de bodem volgt. Hittestress, in combinatie met klimaatverandering, en opwarming van de bodem komen samen in de theorie van de oppervlakte energiebalans. Deze wordt dan ook opvolgend aan hittestress en opwarming van de bodem behandeld. Vervolgens wordt de indeling van de bodemfuncties tegen het licht gehouden waarmee een basis wordt gelegd voor het indelen van de verschillende functies in de bodem.

2.1 HITTESTRESS

Hittestress is een steeds vaker voorkomend begrip binnen de klimaatadaptatie. Er zijn al meerdere studies naar dit onderwerp gedaan. Hierdoor zijn recente documenten beschikbaar over hittestress. Meerdere bronnen zijn geraadpleegd waarop vervolgens een eenduidige definitie voor hittestress is vastgesteld. Ook is het model voor het bepalen van hittestress vastgesteld en verklaard.

2.1.1 Definities

Nijhuis (Nijhuis, 2011) definieert hittestress als volgt: “Door het typisch stedelijk land- en materiaalgebruik (veel wegen en gebouwen, minder groen en water) blijft de warmte er namelijk langer hangen en blijft de temperatuur hoger dan in het omringende landelijk gebied.” In het onderzoek van Nijhuis wordt de volgende concrete waarde voor hittestress genoemd: “Op heldere, windstille zomerse dagen, kan het maximale hitte-eiland-effect in dichtbebouwde gebieden meer dan 8°C kan bedragen” Onderzoek van TNO (Klok, Schamniée, Duyzer, & Steeneveld, 2012) sluiten aan bij de definitie van Nijhuis maar geeft een iets afwijkende specifieke waarde voor hittestress aan: “Overdag kan het oppervlakte hitte-eilandeffect oplopen tot 9 °C.” Er wordt nog een extra invulling gegeven aan de oorzaak van hittestress, namelijk: “niet alleen het materiaalgebruik is van toepassing maar er lijkt een relatie te zijn tussen de bodemsoort van de stad en het hitte-eilandeffect (Surface Heat Island).” Hier wordt in het rapport echter niet dieper op ingegaan. In onderzoek naar klimaatbestendige steden (Rovers, Bosch, & Albers, 2014) is een soortgelijke definitie aan hittestress gegeven: “Tijdens hittegolven is het in iedere stad in Nederland, groot en klein, warmer dan in de omgeving. Dit hitte-eilandeffect is merkbaar op het leefniveau en kan oplopen tot meer dan 7 °C.” De firma Tygron sluit hierbij aan: “Urban areas are generally warmer than surrounding rural areas”

Een citaat van Nijhuis geeft aan dat het uitgevoerde onderzoek als referentie gebruikt kan worden voor andere Europese steden: “Het maximale hitte-eilandeffect (Urban Heat Island (UHI)) intensiteit die op heldere, windstille zomers dagen in Rotterdam worden bereikt zijn aanzienlijk en vergelijkbaar met andere Europese steden.” Om deze reden wordt er aangenomen dat dit niet alleen voor Rotterdam maar ook geldt voor andere Nederlandse steden. In dit onderzoek wordt de definitie van Nijhuis toegepast en wordt de maximale opwarming in stedelijk gebied van 8 °C gehanteerd.

2.1.2 Modellen

Voor het vaststellen van hittestress worden uiteenlopende methoden en modellen gebruikt en toegepast op uiteenlopende gebieden. Nijhuis spitst zich in zijn onderzoek toe op de gemeente Rotterdam. Hiervoor is dan ook een specifieke meetmethode opgezet. Met behulp van een bakfiets, omgebouwd tot rijdend meetstation, is de mate van hittestress in Rotterdam vastgelegd. Klok, Schaminée en Steenveld hebben gebruik gemaakt van satellietbeelden van een hittegolf uit 2006. Deze beelden laten op grove schaal zien dat de grote steden duidelijk te kampen hebben met hittestress.

Rovers, Bosch en Albers baseren hun definitie op andere literatuur en besteden verder geen aandacht aan de manier van vaststellen van hittestress. UNESCO heeft een model ontwikkeld dat in een Tygron Engine wordt gesimuleerd. Dit wordt de hittestress-module genoemd. De module is een integraal model voor de visualisatie van verschillende klimaateffecten met onder andere hittestress. De module werkt op basis van een verzameling van online open-data en kan voor iedere willekeurige plek in Nederland worden toegepast. Hierdoor kan de hittestress-module worden gebruikt voor het casusgebied en is het model bruikbaar voor het onderzoek.

2.1.3 Hittestress-module

In de hittestress-module kan een specifiek gebied worden geselecteerd. Het oppervlak van dit gebied moet minimaal 500x500 meter zijn en in Nederland gelegen zijn. Het geselecteerde gebied wordt door het model vervolgens opgedeeld in cellen. Voor iedere cel wordt de mate van hittestress berekend. Voor het berekenen van de mate van hittestress maakt de module gebruik van een drietal formules. Deze formules worden hieronder getoond en er wordt beschreven waar deze voor dienen. Op deze manier wordt de theorie achter de hittestress-module duidelijk. De symbolen in de formules worden onderaan de paragraaf verklaard. (Tygron)

Het model rekent de mate van hittestress in twee stappen door. Als eerste wordt de temperatuur toe- of afname voor elke specifieke cel berekend. Dit wordt berekend met de volgende formule:

$$calcDTDX(i) = \frac{TE(35,i) - TE(30,i)}{5} + \frac{TE(30,i) - TE(25,i)}{5} + \frac{TE(25,i) - TE(20,i)}{5}$$

In bovenstaande formule wordt het toenemen of afnemen van hittestress berekend door het gemiddelde van vier temperaturen (20, 25, 30 en 35 °C) te nemen. Dit wordt voor iedere cel in het geselecteerde gebied apart gedaan. De temperaturen in deze cel wordt beïnvloed door het oppervlak wat daar aanwezig is. Verschillende oppervlakken dragen namelijk op een verschillende manier bij aan hittestress, of zorgen dat deze juist afneemt, zie Tabel 1. Onderstaande formule is een functie van calcDTDX waardoor de invloed van het oppervlak gecombineerd wordt met de temperatuur voor de desbetreffende cel.

$$TE(T,i) = CF * (DTi + 0.1 * DTi * (T - 20))$$

Landuse	DT	Landuse	DT	Landuse	DT	Landuse	DT
Builted area	5	Pedestrian area	8	Mixed forest	-9	Soil	6
Large buildings	6	Street	3	Poplar lane	-7	Cemetery	-3
Warehouses	7	Cycling lane	5	Arable land	-1	Fruit finyard	-6
High way	7	Parking	8	Pastures	-6	Dock	0
Paved road	4	Forest	-10	Orchard	-8	House	4
Dirt road	3	Surface water	-9	Sand	-1	Coast	-10

Tabel 1: Waarden waarin oppervlakken bijdragen aan hittestress in de module. 10 is maximale en -10 is minimale bijdrage aan hittestress.

Aan de hand van calcDTDX wordt de mate van hittestress voor één specifieke cel doorgerekend. Om een kaart te creëren waarin de mate van hittestress rekening houdt met omliggende cellen wordt een geleidingsfactor in het model toegepast. Ook wordt het aantal omliggende cellen en de tijd meegenomen. De formule hiervan wordt op de volgende pagina getoond:

$$hEi = \sum_{t=1}^n wd * calcDTDx(i)$$

De uitkomst uit bovenstaande formule is de toename of afname van hittestress (in °C) op jaarbasis voor een specifieke cel. Deze uitkomst houdt rekening met de cellen in een straal van 40 meter rondom de berekende cel. Door deze berekening voor iedere cel in het casusgebied toe te passen genereert het model een vlak dekkend raster waaraan de mate van hittestress is gekoppeld.

Verklaring symbolen:

hEi	=mate van hittestress	°C
n	=aantal tiles in straal van 40 meter	-
t	=tijd	jaren
i	= tile/cel	-
wd	=geleidingsfactor	-
calcDTDx	=hittestress	°C
T	=temperatuur	°C
TE	=temperatuur	°C
CF	=constante	0.6
DT	=hittestress waarde per oppervlak	zie Tabel 1

2.2 OPWARMING VAN DE BODEM

De koppeling van hittestress naar de bodem is een uniek onderwerp waar nog nauwelijks praktijkonderzoek naar is gedaan. Er zijn geen onderzoeken achterhaald die letterlijk de vertaalslag van hittestress naar de bodem maken. Om de vertaalslag naar de opwarming van de bodem toch te kunnen maken is gezocht naar onderzoeken die zich richten op alleen de opwarming van de bodem.

2.2.1 Definities

In een artikel van het KWR (Molen M. v., Pieterse-Quirijns, Donocik, & Smulders, 2009) bepalen de onderzoekers een jaargemiddelde bodemtemperatuur op een meter diepte in Oosterhout. Het jaargemiddelde wordt als volgt gedefinieerd: “De temperatuur bij pompstation Oosterhout varieert tussen 11,3 en 13,2°C; het jaar gemiddelde bedraagt 12,5°C.” Deze gemiddelde temperatuur komt overeen met de bevindingen van het TNO (TNO, 2017) dat stelt: “Op zo'n tien meter diepte heerst een constante temperatuur van 10°C. Daaronder neemt de temperatuur steeds verder toe.” Het temperatuurverschil is te verklaren uit de diepteverschillen. Hoe dicht bij het oppervlak hoe meer invloed de buitentemperatuur heeft op de bodemtemperatuur. Op basis van bovenstaande artikelen wordt in dit onderzoek uitgegaan van een standaard gemiddelde bodemtemperatuur 11 °C.

P. Kroon (Kroon P. , 2004) definieert de mate waarin de bodem opwarmt als volgt: “De bodem warmteflux is de hoeveelheid warmte die per seconde door het aardoppervlak de bodem ingaat.” Dit wordt beschreven volgens een formule waarin de warmtegeleidingscoëfficiënt, de temperatuurverandering en de diepte zijn meegenomen. M. Rutten (Rutten, 2017), lector aan Hogeschool Rotterdam, vertelt in een interview dat ze het eens is met deze definitie. Zij beschrijft de straling die de bodem opwarmt als een energiebalans. “De netto straling die de aarde bereikt als kortgolvlige en langgolvlige straling, warmt naast de bodem ook de atmosfeer op en zorgt voor verdamping. Dit proces verloopt volgens de wet van behoud van energie.” Deze stelling wordt aangehouden in dit onderzoek.

2.2.2 Modellen

De opwarming van de bodem kan met verschillende modellen worden vertaald. Tijdens dit onderzoek is er naar drie modellen gekeken, namelijk: het bodem-model, model van de Colorado University en een model van de Louisiana University.

Het KWR (Molen M. v., Pieterse-Quirijns, Donocik, & Smulders, 2009) definieert haar in Matlab geschreven model als volgt: “Met behulp van het nu beschikbare model kan voor verschillende weersomstandigheden (bijvoorbeeld op basis van historische reeksen van het KNMI) en verschillende bodemtypes en bodembedekking (bijvoorbeeld op basis van geografische informatie uit de bodemkaart Nederland) en informatie over de ligging van het leidingnet een ‘hotspotanalyse’ worden gedaan. Met deze analyse kan worden bepaald waar en wanneer het leidingwater te warm kan worden.” Hierbij kan de analyse van de opwarming van leidingwater achterwege gelaten worden en enkel gefocust worden op de opwarming van de bodem. De Colorado University (Bouler, 2017) zegt het volgende over haar manier om bodemopwarming te bepalen: “As the surface is heated or cooled, the heat will diffuse through the soil and rock. Mathematically, diffusion may be represented by the equation.” Op basis van reeds genoemde formules kan in het programma Matlab de bodemtemperatuur worden doorgerekend. Hierin wordt gebruik gemaakt van temperatuurverschillen, dieptes en warmtegeleidingscoëfficiënten. De Louisiana University (Besser, 2002) heeft een spreadsheet ontwikkeld waarmee tweedimensionaal het warmtetransport kan worden bepaald. Het wordt als volgt beschreven: “The method can be extended by solving problems with time dependence (transient problems), problems with geometries that would benefit from rectangular rather than square elements, geometries with edges at oblique angles, and even three-dimensional problems.”

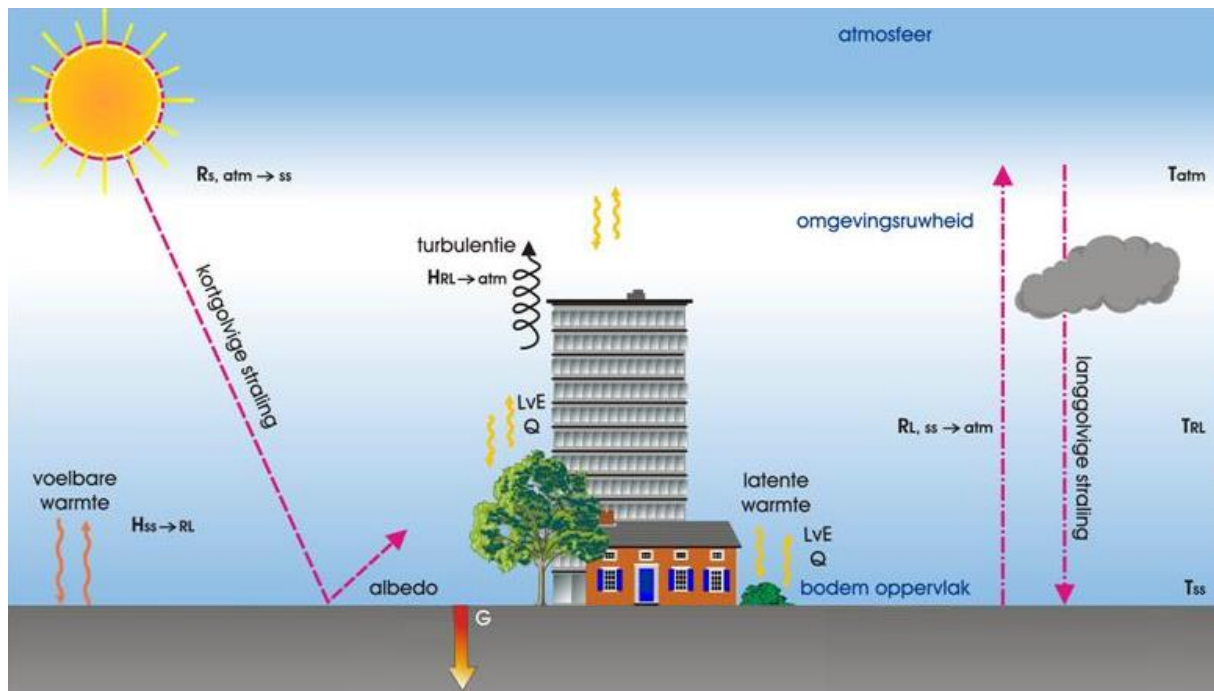
De door de Colorado University ontwikkelde formules zijn het minst toegankelijk. Dit heeft als reden dat de invoerparameters niet representatief zijn voor bijvoorbeeld de Nederlandse veengronden. Hierbij zouden de formules een vertaalslag naar de Nederlandse bodem moeten ondervinden. De in 2002 ontwikkelde spreadsheet door de Louisiana University worden als goed bevonden. Echter is het geen deel van het onderzoek om meerdere modellen toe te passen dus verdere analyse van dit model is buiten beschouwing gelaten. Het KWR heeft in een kennismakingsgesprek aangegeven bereid te zijn medewerking te verlenen aan dit onderzoek. Het model werkt op basis van Matlab en maakt gebruik van een standaard input venster, en is om deze reden gebruiksvriendelijk. Het model werkt op basis van de reeds genoemde oppervlakte energiebalans. Deze energiebalans, beter bekend als de oppervlakte energiebalans, wordt in de volgende paragraaf verder toegelicht.

2.3 OPPERVLAKE ENERGIEBALANS

De balans bestaat uit een vergelijking met verschillende parameters. Onderstaand wordt de vergelijking weergegeven en worden alle parameters uitgewerkt. Tot slot komen alle parameters uit de oppervlakte energiebalans samen in de laatste sub paragraaf. Een schematische weergave van de oppervlakte energiebalans is afgebeeld op de volgende pagina in Figuur 3. De letters uit de afbeelding komen overeen met onderstaande vergelijking en worden als sub paragrafen onder de afbeelding uitgelicht. De informatie met betrekking tot de oppervlakte energiebalans is gebaseerd op een rapport van het KNMI: “De sluiting van de oppervlakte energiebalans in Cabauw” (Kroon P. , 2004).

$$Q_s + Q_f - G = H + L_v E$$

Q_s =	netto straling;	kort- en langgolvlige straling	(W/m ²)
Q_f =	antropogene warmte;	warmte door menselijk handelen	(W/m ²)
G =	bodem warmteflux;	geabsorbeerd door aarde	(W/m ²)
H =	sensibele warmteflux;	voelbare warmte	(W/m ²)
$L_v E$ =	latente warmteflux;	verdamping	(W/m ²)



Figuur 3: Schematische weergave oppervlakte energiebalans. Bron: (Blokker & Pieterse-Quirijns, 2010)

2.3.1 Netto straling (Q_s)

Dit geeft de optelling weer van de op- en neerwaartse kortgolvlige straling en de op- en neerwaartse langgolvlige straling. Beiden worden hieronder toegelicht.

Kortgolvlige straling

Dit is de straling die direct of indirect afkomstig is van de zon. Straling richting het aardoppervlak is neerwaartse straling. De hoeveelheid die het oppervlak daadwerkelijk bereikt is afhankelijk van de bewolgingsgraad en de opname in de atmosfeer. Kortgolvlige straling kan worden geabsorbeerd door oppervlakken, hoe lager het albedo van het oppervlak hoe meer straling wordt geabsorbeerd. Dit effect wordt vergroot door weerkaatsing tussen gebouwen en straat oppervlakken, ook wel indirecte straling genoemd. Doordat verharde oppervlakken bestaan uit materialen met een hoge emissiviteit kan de straling in de vorm van warmte beter en langer worden opgeslagen. Om deze reden vindt er meer straling plaats in het stedelijk gebied dan in het landelijk gebied.

De straling van het aardoppervlak af is opwaartse straling. De hoeveelheid opwaartse straling is gelijk aan de hoeveelheid gereflecteerde kortgolvlige neerwaartse straling. Dit wordt groter naarmate er meer oppervlakken met een hoog albedo zijn.

Langgolvlige straling

Dit is straling die direct of indirect afkomstig is van de atmosfeer. De opwaartse straling hangt sterk af van de temperatuur. Een hoge temperatuur zorgt voor meer straling. De opwaartse straling wordt deels geabsorbeerd door atmosferische gassen, en deels terug richting aardoppervlak gestraald. De terug gestraalde neerwaartse straling zorgt voor het ontstaan van meer warmte, ook wel het broeikas effect genoemd. Dit effect is groter in het stedelijk gebied, doordat hier meer luchtvervuiling wordt geproduceerd dan in het landelijk gebied. De geproduceerde luchtvervuiling blijft langer in de stad hangen doordat de hoge gebouwen zorgen voor minder wind.

De stralingsbalans is in normale situaties over een dag gekeken gelijk. Doordat overdag de zon schijnt komt er meer energie binnen dan eruit gaat in balans. 's Nachts gaat er meer energie uit dan er binnen komt, dit is het gevolg van het ontbreken van zonlicht terwijl de aardoppervlak wel warmte uitstraalt.

2.3.2 Antropogene warmte (Q_f)

Dit is warmte ontstaan door menselijke activiteiten. Onder deze vorm van warmte vallen: transport (uitlaatgassen en wrijving), industriële handelingen (bijvoorbeeld fabrieken die warmte uitstoten), de stofwisseling van de mens en de energie die nodig is om gebouwen in de winter te verwarmen en in de zomer te verkoelen. Deze factoren verschillen per breedtegraad, seizoen en bevolkingsdichtheid (Stewart & Oke, 2012).

2.3.3 Bodem warmteflux (G)

Dit is de hoeveelheid warmte die per seconde door het aardoppervlak de bodem ingaat. De warmteflux zorgt ervoor dat het oppervlak opwarmt. De energie die het oppervlak doorgeeft aan de bodem zorgt voor bodemopwarming. Dit wordt ook wel het warmtetransport in de bodem genoemd.

De twee belangrijkste mechanisme van warmtetransport in de ondiepe bodem zijn geleiding door korrel en poriënwater, en convection met de grondwaterstroming. Het warmtetransport vindt plaats tussen twee plaatsen (bijvoorbeeld twee zandkorrels) met een verschillende temperatuur. Energieoverdracht verloopt van de warme naar de koude plaats door moleculaire interacties als gevolg van het verschil in kinetische energie. De mate van warmtetransport is vervolgens afhankelijk van de bodemeigenschappen van het desbetreffende bodemtype. (Lysebetten, Huybrechts, & Francois, 2013)

2.3.4 Turbulente warmtefluxen ($H + L_vE$)

Deze warmteflux is een verzamelnaam voor twee losse warmtefluxen. Als eerste is er de sensibele warmteflux, ook wel de voelbare warmte genoemd. Deze warmte zorgt ervoor dat de atmosfeer en daarmee dus de temperatuur opwarmt. Ten tweede is er een latente warmteflux, ook wel verdamping genoemd. Deze warmteflux zorgt ervoor dat er vocht wordt onttrokken uit de bodem of vegetatie, en er zo dus een verkoelend effect ontstaat.

2.3.5 Het hitte-eilandeffect

Een samenvatting van de oppervlakte energiebalans is te schrijven als het hitte-eilandeffect. Dit wordt onderstaand nader toegelicht.

In het stedelijk gebied zijn de antropogene warmte (Q_f) en de netto straling (Q_s) groter dan in het landelijk gebied. Hierdoor ontstaat er meer warmte, en zal dit dus omgezet moeten worden naar de bodem warmteflux (G) en de turbulente warmtefluxen ($H+L_vE$).

Doordat er weinig vegetatie en veel verhardoppervlak in het stedelijk gebied is, zijn er weinig mogelijkheden voor verdamping (L_vE). Dit heeft als gevolg dat de voelbare warmte (H) toeneemt, en zo dus het stedelijk gebied sneller opwarmt. Deze warme gebieden geven meer warmte af aan de bodem (G), dus zal ook de bodemtemperatuur sneller oplopen.

2.4 BODEMEIGENSCHAPPEN

De opbouw van de bodem bestaat uit verschillende bodemtypen. Ieder bodemtype heeft andere bodemeigenschappen. Deze bodemeigenschappen spelen een belangrijke rol bij het opwarmen van de bodem. Het is dus van belang te weten welk bodemtype er in een gebied aanwezig is. Tevens hebben de grondwaterstanden invloed op deze bodemeigenschappen.

Voor de fysieke staat van de bodem kunnen verschillende bronnen geraadpleegd worden. Als eerste Dinoloket (Dinoloket, 2017). Dit is een uitgifte portaal van onderzoeksinstituut TNO, met zeer toegankelijke en betrouwbare informatie over de ondergrond van Nederland. Zo kan voor specifieke punten de geologische eenheden, lithoklasse en geohydrologische bodemstaten weergegeven worden. Naast Dinoloket heeft TNO ook andere portalen met informatie over de Nederlandse ondergrond zoals

Geologische Dienst Nederland (TNO innovation for life, 2017). Het is echter niet mogelijk om specifieke punten of doorsnedes te generen. Vervolgens bestaat er nog ThermoGIS (TNO, 2013), tevens ontwikkeld door TNO. Hier is het mogelijk de aardlagen op locatie weer te geven. Vervolgens kan er gekeken worden naar de mogelijkheid om hier aardwarmte te winnen.

Voor dit onderzoek is het van belang de fysieke staat van de bodem te weten, het bodemtype. Dit kan het best verkregen worden van Dinoloket. Er kan specifiek op locatie worden ingezoomd en de benodigde informatie worden verkregen. ThermoGIS en Geologische Dienst Nederland missen de specifieke informatie die Dinoloket wel biedt.

2.5 BODEMFUNCTIES

De bodem kan op meerdere manieren worden ingedeeld. Verschillende bronnen bieden hier verschillende methoden voor aan. Er is gezocht naar een logische en specifieke indeling. Er zijn drie indelingen bekeken, namelijk die van: Ruimtexmilieu, Dinoloket en GroenKennisnet.

Ruimtexmilieu (Ruimtexmilieu, Ruimte met toekomst, 2017) is een website die inspiratie voor een duurzame leefomgeving aanbiedt. Deze instantie geeft handvaten om de bodem in te delen: “De checklist ondergrondkwaliteiten biedt het overzicht van de ondergrondkwaliteiten geordend naar de vier hoofdkwaliteiten.” Dinoloket (Dinoloket, 2017) wijkt hiervan af door de ondergrond in te delen in verschillende gegevens: “De volgende gegevens zijn op de kaart op de tab ondergrondgegevens beschikbaar: Geologie, Archeologie, Sonderingen, Geo-elektrisch, Waterbodem en overig.” GroenKennisnet (Kennisnet, 2016) heeft weer een andere kijk op de bodemfuncties: “Je kunt de bodem indelen aan de hand van eigenschappen: 1. Fysisch 2. Chemisch 3. Biologisch. Al deze eigenschappen zijn van belang bij het vaststellen van de bodemkwaliteit”

De indeling van Dinoloket geeft onvoldoende aanknopingspunten om de effecten van hittestress op het functioneren van de bodem aan te koppelen. Groenkennisnet geeft een indeling die te beknopt is en te weinig verschil in bodem functies geeft. Om de bodemfuncties in dit onderzoek in te delen wordt de ondergrondkwaliteiten-tabel gehanteerd zoals Ruimtexmilieu deze presenteert. Deze tabel deelt de bodemfuncties in vier hoofdfuncties, namelijk draag, informatie, regulatie en productie. In Bijlage 1: Bodemfuncties worden deze vier hoofdfuncties verder gespecificeerd en met afbeeldingen geïllustreerd.

3 METHODE

Om een uitspraak te doen over de effecten die de bodemfuncties ondervinden door opwarming van de bodem, als gevolg van klimaatverandering en hittestress, is een unieke methode opgezet. In deze methode wordt gebruik gemaakt van literatuuronderzoeken, verschillende rekenmodellen, computerapplicaties en interviews. Per deelvraag wordt de toegepaste methode toegelicht en wordt verwoord hoe deze methode is uitgevoerd.

Vooronderzoek:

Voorafgaand aan dit onderzoek is naar een geschikt casusgebied gezocht. Voor het casusgebied zijn twee criteria opgesteld waar minimaal aan voldaan moet worden. Ten eerste is de grootte van het casusgebied van belang. Rekening houdend met de beperkte duur van het onderzoek wordt naar een gebied ter grootte van een wijk gezocht. Ten tweede moet in het casusgebied hittestress optreden. Tijdens gesprekken met het IBA werd duidelijk dat de Spaarndammerbuurt te Amsterdam aan deze criteria voldoet.

Verder is in het vooronderzoek een afstemming gemaakt met Tygron en het KWR Watercycle Research Institute. Eerstgenoemde stelt een hittestress-module beschikbaar voor het onderzoek. Op deze manier kan hittestress in het casusgebied worden vastgesteld. Het KWR stelt het model om de opwarming in de bodem door te rekenen beschikbaar.

Deelvraag 1: *In welke mate treedt er hittestress op in het casusgebied en welke onderzoeklocaties kunnen hieraan gekoppeld worden?*

Door het toepassen van de hittestress-module kan een voorspelling worden gedaan over de mate van hittestress. Dit gebeurt op jaarbasis aangezien de module een uitkomst genereert met jaargemiddelde. De output uit het model is een vlakdekkend bestand. Dit bestand wordt in ArcGIS verwerkt tot een bruikbare en leesbare hittestress indicatie kaart.

Doordat de hittestress-module gebruik maakt van online open-data bevat de gebruikte bron soms gegevens waar de actuele situatie inmiddels vanaf wijkt. Om een compleet beeld te schetsen wordt er op basis van een ArcGIS-analyse in combinatie met overleg met IBA de oppervlakgebruiken in het casusgebied vastgesteld.

Door in ArcGIS de hittestresskaart te combineren met de meest actuele oppervlakgebruiken kan per oppervlakgebruik een onderzoekpunt in het casusgebied worden bepaald. Daarbij moet de invloed van andere oppervlakgebruiken dan het betreffende oppervlakgebruik zo klein mogelijk zijn. Dus worden de punten zo gekozen dat er zo veel mogelijk van hetzelfde oppervlakgebruik rondom de onderzoekpunten aanwezig is.

Deelvraag 2: *Welke klimaatgegevens, die betrekking hebben op de opwarming van stedelijk gebied, veranderen er in de toekomst en in welke mate veranderen deze?*

Door middel van een literatuurstudie zijn de klimaatscenario's van het KNMI achterhaald. Van de vier beschikbare klimaatscenario's is de meest extreme toegepast. Hierdoor wordt de opwarming van de bodem in de toekomst niet onderschat. Door de klimaatveranderingen te combineren met een huidige klimaatreeks ontstaat er een duidelijk beeld van de opwarming van stedelijk gebied. Het combineren van klimaatreeks gebeurt door middel van MS-Excel berekeningen.

Deelvraag 3: *Welke gegevens zijn er benodigd voor het bodem-model, en welke variabele waarden zijn hieraan gekoppeld voor de verschillende onderzoeklocaties?*

Het bodem-model heeft vaste parameters waarmee de opwarming van de bodem wordt doorgerekend. Na informatie-uitwisseling met het KWR is vastgesteld welke invoerparameters er verzameld dienen te worden. Door een literatuurstudie, contact met Waternet, overleggen met IBA en gesprekken met deskundige binnen Sweco zijn de waarden van de gegevens in bodem-model voor de verschillende onderzoeklocaties vastgesteld.

Deelvraag 4: *Hoe verloopt het proces van bodemopwarming op de onderzoeklocaties voor de huidige en toekomstige situatie?*

Voor het doorrekenen van de opwarming van de bodem is het programma Matlab gebruikt. Het bodem-model is een in Matlab geschreven script en is enkel toegankelijk bij het KWR. Het is een tweedimensionaal model waarmee de temperatuur in één punt doorgerekend kan worden. Door het invoeren van de verzamelde parameters en de klimaatscenario's wordt een uitkomst gegenereerd. Hierin wordt de mate van opwarming van de bodem, het tijdsbestek en de diepte van deze opwarming per onderzoeklocatie duidelijk. Deze uitkomsten kunnen in MS-Excel worden bewerkt tot bruikbare tabellen, grafieken en figuren.

Deelvraag 5: *Welke bodemfuncties zijn er aanwezig in het casusgebied, en aan welke oppervlakgebruiken zijn deze gekoppeld?*

Voor het achterhalen van de bodemfuncties is voor kabels, leidingen en riolering een KLIC-melding gemaakt. Aan de hand van deze melding zijn de locaties van de kabels en leidingen in het casusgebied duidelijk gemaakt. De overige oppervlakgebruiken zijn achterhaald door middel van literatuurstudie, veldbezoek en overleg met IBA.

Deelvraag 6: *In welke mate heeft de bodemopwarming gevolgen voor de bodemfuncties in het casusgebied?*

Op basis van de tabellen, grafieken en figuren die volgen uit deelvraag 4 en de achterhaalde bodemfuncties uit deelvraag 5 is in MS-Excel een overzichtstabel gecreëerd. Hierin is aangegeven in welke mate de bodem opwarmt en is een inschatting gemaakt of dit gevolgen kan hebben voor de desbetreffende bodemfunctie. Dit is gedaan door interviews af te nemen bij deskundige binnen Sweco. Betreffende effecten of gevolgen op bodemfuncties zijn waar mogelijk aan de hand van een literatuurstudie getoetst. Het betreft dus een kwalitatieve analyse.

4. TOEPASSING EN RESULTATEN

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is om de effecten op de bodemfuncties, als gevolg van opwarming van de bodem, in beeld te brengen. Hiervoor moet eerst de opwarming van de bodem worden bepaald. De opwarming van de bodem kan met de gehanteerde methode enkel voor specifieke punten worden doorgerekend. Om deze specifieke punten te bepalen wordt eerst het casusgebied geanalyseerd. Op basis van deze analyse worden de onderzoekpunten bepaald. Voor het berekenen van de opwarming zijn verschillende invoergegevens benodigd. Zo worden voor de onderzoeklocaties weergegevens, bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen verzameld. Deze gegevens worden ingevoerd in het bodem-model waarmee vervolgens de opwarming van de bodem wordt uitgerekend. Tot slot wordt per onderzoekpunt de bodemfuncties achterhaald. Voor ieder van deze bodemfuncties wordt de opwarming voor de verschillende klimaatscenario's weergegeven. Op deze manier worden de effecten op deze bodemfuncties als gevolg van opwarming van de bodem inzichtelijk. Hierbij wordt met betrekking tot duurzaamheid naar een toekomstige situatie gekeken.

4.1. CASUSGEBIED

Er wordt gestart met een analyse die bestaat uit twee delen. Het eerste deel is het achterhalen van de verschillende oppervlakgebruiken. In het tweede deel wordt de mate van hittestress vastgesteld. Door een combinatie van deze twee analyses te maken worden vervolgens de onderzoekpunten bepaald.

4.1.1. Oppervlakgebruiken

In het casusgebied komen acht verschillende soorten oppervlakgebruiken voor. In deze paragraaf wordt de verdeling van de oppervlakgebruiken weergegeven, zie Figuur 4. Vervolgens wordt in Tabel 2 weergegeven hoe groot ieder oppervlakgebruik is. Dit geeft een overzichtelijk beeld van de verschillende oppervlakgebruiken. Tot slot wordt er voor ieder oppervlakgebruik een korte toelichting gegeven.



Figuur 4: Oppervlakgebruiken in de Spaarndammerbuurt. Gegeneerd uit ArcGIS. Originele kaart is terug te vinden in Bijlage 4: Oppervlakgebruiken.

Gebruik	Oppervlak (ha)	Percentage (%)
Bebouwing	21,7	15
Begraafplaats	2,9	2
Boomstructuur	9,7	7
Water	7,3	5
Plein	15,6	11
Wegen	23,8	17
Spoor	23,7	17
Open groen	36,6	26
Totaal	141,3	100

Tabel 2: Oppervlakgebruik met bijhorende grootte en de bedekkingsgraad in % t.o.v. het gehele casusgebied.

Bebouwing

Het grootste gedeelte van de bebouwing bevindt zich in de woonwijk in het oosten van het casusgebied. Dit is voornamelijk hoogbouw. Verder zijn er verspreid over het casusgebied nog enkele grote gebouwen gelegen zoals het zalencentrum Zuiveringshal West in het zuiden, het centraal gelegen NedTrain gebouw en in het westen jeugdinstelling Spirit.

Begraafplaats

Opvallend is begraafplaats St. Barbara. De begraafplaats stamt uit de 17^e eeuw en is daarom een cultuurhistorische plek (St.Barbara, 2013). De begraafplaats bedekt een uitzonderlijk klein gedeelte van het oppervlak. Vanwege de uniciteit is ervoor gekozen om dit gebruik apart uit te lichten.

Boomstructuur

Het casusgebied is voor bijna één tiende bedekt met bomen. Dit zijn hoofdzakelijk loofbomen die geschikt zijn voor een stadsklimaat. De bomen vormen voornamelijk een als fysieke afscheiding tussen verschillende oppervlakgebruiken.

Water

In de Spaarndammerbuurt bevinden zich verschillende waterpartijen. Zo kent de woonwijk enkele waterpartijen, maar ook in het Westerpark zijn deze aanwezig. De overige waterpartijen zijn watergangen die dienen voor de waterhuishouding van de stad.

Plein

In de Spaarndammerbuurt zijn verschillende pleinen aanwezig. Zo bedekt het plein rondom de Zuiveringshal West een groot deel van het oppervlak in het zuiden. In het oosten zijn er pleinen in de vorm van speel- en binnenplaatsen. Dit zijn verharde oppervlakken die niet dienen als rijvlak.

Wegen

Door de verspreiding van de wegen vallen deze niet zo op, toch bedekken ze een groot gedeelte van het casusgebied. Onder de noemer wegen vallen alle oppervlakken die bestraat of geasfalteerd zijn en die dienen als rijvlak, parkeerplaats of voetpad.

Spoor

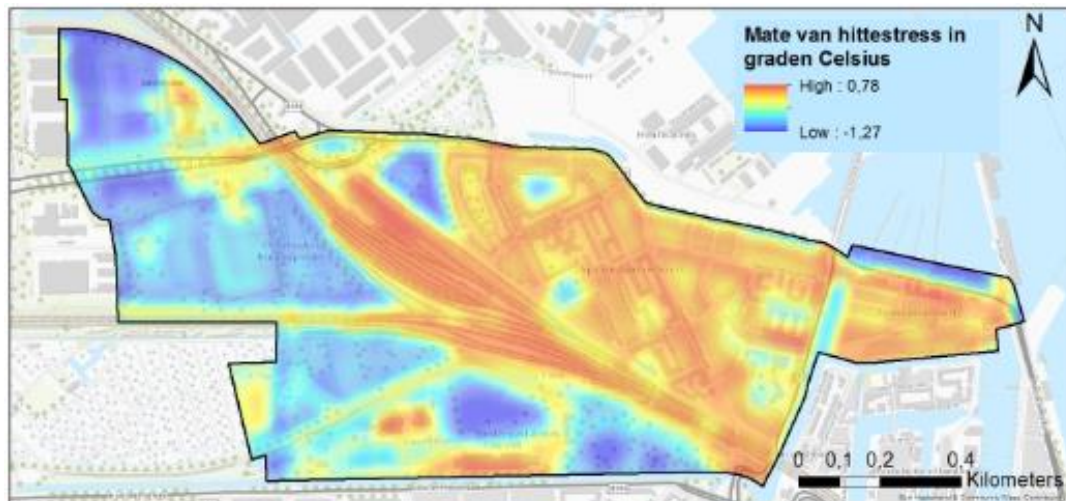
Het centraal gelegen spoornetwerk is kenmerkend voor de Spaarndammerbuurt. Dit sporennetwerk zorgt voor een fysieke scheiding tussen de woonwijk in het oosten en de groenere structuren in het westen.

Open groen

Het Westerpark in het zuiden, de sportvelden in het noorden en Stadsboerderij West in het westen zorgen voor veel open groen in het casusgebied.

4.1.2. Hittestress

De mate van hittestress in de Spaarndammerbuurt is vastgesteld met de eerdergenoemde hittestress-module. In Figuur 5 is de mate van hittestress in het casusgebied weergegeven. Deze mate van hittestress zijn jaargemiddelde waarden. De maximale opwarming op jaarbasis bedraagt 0,78 °C. De maximale afkoeling bedraagt -1,27 °C. De gemiddelde mate van hittestress over het gehele gebied bedraagt een afkoeling van -0,12 °C. Ondanks dat de Spaarndammerbuurt zich bijna in het centrum van Amsterdam gelegen is, vindt er op jaarbasis afkoeling plaats. Toch zijn er grote verschillen. De gedeeltes die opwarmen zijn grotendeels verhard, terwijl de afkoelende delen veelal groenstructuren zijn. De hoogste opwarming vindt plaats in dichtbebouwd gebied en op het spoor. (Tygron)



Figuur 5: Mate van hittestress in °C voor de Spaarndammerbuurt. Gegenereerd uit de hittestress-module. Originele kaart is terug te vinden in Bijlage 5: Hittestress Spaarndammerbuurt.

4.1.3. Onderzoekpunten

Voor ieder oppervlakgebruik is één onderzoekpunt gekozen. Hierbij is onderzoekpunt water achterwege gelaten omdat de opwarming van de bodem hier niet doorgerekend kan worden. Vervolgens is gezocht naar een punt per oppervlakgebruik waar de invloed van de hittestress enkel en alleen afkomstig is van hetzelfde oppervlakgebruik. De locaties van de onderzoekpunten zijn weergegeven in Figuur 6. Hierin is een nummering in volgorde van west naar oost op de kaart gehanteerd.



Figuur 6: Onderzoekpunten. Originele kaart is terug te vinden in Bijlage 6: Onderzoeklocaties.

4.2. INVOERPARAMETERS BODEM-MODEL

De opwarming van de bodem wordt doorgerekend met behulp van het eerdergenoemde bodem-model. Dit model berekent de opwarming van de bodem op basis van weergegevens, bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen. Deze gegevens zijn per onderzoeklocatie verschillend. Onderstaand is weergegeven hoe de invoerparameters zijn verzameld en wordt bij iedere invoerparameter toegelicht hoe deze de bodemopwarming beïnvloedt. Het verzamelen van de invoerparameters is een uitgebreid proces. Hierdoor bevat deze paragraaf enkel de hoofdzaken per invoerparameter. De volledige uitwerking over het achterhalen van de invoerparameters is weergegeven in Bijlage 3: Deelrapport A.

4.2.1. Weergegevens

De weergegevens zijn afkomstig van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Uit de weergegevens van het KNMI zijn de relevante parameters voor het bodem-model gefilterd, dit zijn: windrichting, uurgemiddelde windsnelheid, hoogste windstoot, temperatuur, globale straling, uursom van de neerslag, luchtdruk, bewolking en relatieve vochtigheid. Deze gegevens zijn gemeten op het KNMI Weerstation Schiphol, deze is het meest representatief voor de Spaarndammerbuurt.

Voor de huidige situatie is een KNMI jaarreeks van het jaar 2006 gehanteerd. Dit jaar wordt gebruikt omdat dit jaar een hittegolf van zestien dagen, inclusief 8 tropische dagen bevatte. De gegevens met betrekking tot deze jaarreeksen zijn terug te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

In het onderzoek wordt naast de huidige situatie ook een toekomstscenario uitgewerkt. Voor het toekomstbeeld wordt de KNMI jaarreeks van 2006 aangepast. Dit gebeurt aan de hand van de KNMI'14 klimaatscenario's (Tank, Jules, Bessembinder, Hurk, & Lenderink, 2015). Voor het toekomstscenario is gekozen voor het jaar 2050. Dit is gedaan omdat in 2050 het aantal tropische dagen toeneemt van ongeveer vijf naar 23 per jaar. Dit betekent dat het gemiddeld een kleine maand warmer is dan 30°C (Brink, 2013). Door naar een toekomstige situatie te kijken wordt er in dit onderzoek rekening gehouden met duurzaamheid. De klimaatscenario's van het KNMI geven per parameter de bepaalde toe- of afname aan in vergelijking met het huidige scenario. Een uitwerking van de verwachte klimaatveranderingen is verwerkt in Deelrapport A. Een overzicht met de meest extreme klimaatveranderingen per parameter in vergelijking met het huidige scenario is weergegeven in Tabel 3.

Parameter	Eenheid	2050 zomer t.o.v. 2006	2050 winter t.o.v. 2006
Windrichting	(Graden)	Meer westenwind	Meer westenwind
Uur gem windsnelheid	(m/s)	+2,2%	+2,2%
Hoogste windstoot	(m/s)	+2,2%	+2,2%
Temperatuur	(°C)	+2,4 °C	2,4
Globale straling	(J/cm ²)	9%	9%
Uursom neerslag	(mm)	-10%	+10%
Bewolking	-	-	-
Relatieve luchtvochtigheid	(%)	-2,5	-2,5

Tabel 3: Overzicht klimaatscenario 2050 in vergelijking met 2006

4.2.2. Bodemeigenschappen

Iedere onderzoeklocatie heeft een verschillend bodemtype. Ook heeft iedere onderzoeklocatie een unieke grondwaterstand en soortelijke massa. Door het bodemtype te combineren met de grondwaterstand kunnen de thermische bodemeigenschappen voor het betreffende onderzoekpunt worden bepaald. Deze thermische bodemeigenschappen zijn de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmtecapaciteit. Het achterhalen van het bodemtype met bijhorende bodemeigenschappen is terug te vinden in Deelrapport A. In Tabel 4 zijn de resultaten hiervan per onderzoeklocatie uitgelicht.

Nr.	Onderzoekpunt	Bodemtype	gws - mv (cm)	λ^1	ρ^2	Cp^3
1	Boomstructuur	Klei	35	2,22	2000	0,6
2	Begraafplaats	Zand, fijn	>300	0,75	1400	0,9
3	Spoor	Zand, grindhoudend	>175	0,5	1450	0,9
4	Plein	Zand, matig fijn	118	1,73	1750	0,8
5	Open groen	Zand, slibhoudend	140	0,27	1250	1,0
6	Wegen	Zand, matig fijn	115	1,73	1750	0,8
7	Bebouwing	Zand, matig grof	120	1,8	1900	0,9

¹ Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/m.K)

² Soortelijke massa (kg/m³)

³ Warmtecapaciteit (J/kg.K)

Tabel 4: Overzicht bodemtype en bodemeigenschappen

Op basis van het bodemtype in combinatie met mate van verzadigdheid zijn de bodemeigenschappen vastgesteld. Met betrekking tot het bodemtype is er uitgegaan van niet-gelaagde bodems. Onderstaand worden de bodemeigenschappen toegelicht.

De warmtegeleidingscoëfficiënt is een materiaalconstante die aangeeft hoe goed het materiaal warmte geleidt. Hoe hoger de waarde, hoe beter deze warmte geleidt (Witte & Gelder, 2003).

De soortelijke massa, ook wel de dichtheid, is het aantal kilogram per kubieke meter van een materiaal indien dat aantal constant is. Hoe hoger de soortelijke massa van de bodem, hoe meer energie er nodig is om de bodem op te warmen (Vereniging 'De Binnenvaart', 2017).

De warmtecapaciteit is de waarde die aangeeft hoeveel warmte-energie (in Joules) er nodig is om één kg stof één graad te doen stijgen (Witte & Gelder, 2003).

4.2.3. Lokale gebiedseigenschappen

Zoals blijkt uit paragraaf 4.1 heeft ieder onderzoekpunt een ander gebruiksoppervlak. Hiermee is elk onderzoekpunt uniek in de aan- of afwezigheid en de soort van bebouwing en omgeving. De invloed van de bebouwing en omgeving wordt beschreven als lokale gebiedseigenschappen. Deze lokale gebiedseigenschappen worden meegenomen in het berekenen van de opwarming van bodem. Aan de hand van de gebiedsindeling van Stewart en Oke (Stewart & Oke, 2012) wordt voor iedere onderzoeklocatie de lokale gebiedseigenschappen (Local Climate Zone (LCZ)) vastgesteld. Aan deze LCZ zijn de twee factoren gekoppeld, namelijk element hoogte en antropogene warmte. Door een unieke LCZ aan ieder onderzoekpunt te koppelen worden deze factoren meegenomen bij het doorrekenen van de opwarming van de bodem. (Stewart & Oke, 2012).

Met het element hoogte wordt de gemiddelde hoogte van de gebouwen of de gemiddelde hoogte van de planten of bomen in meters bedoeld. Hoe hoger de elementen, hoe beter de wind wordt gebroken. Minder wind betekent minder afkoeling en dus stijging van de temperatuur.

Met antropogene warmte wordt de jaarlijkse gemiddelde warmteafgifte bedoeld die vrijkomt bij verbranding van brandstoffen en menselijke activiteiten (transport, koelen/verwarmen, industriële verwerking en de menselijke stofwisseling) in Watt per m² (Stewart & Oke, 2012). Tijdens de berekening met het bodem-model is steeds de hoogste waarde aangehouden.

In Deelrapport A wordt toegelicht hoe er per gebruiksoppervlak een bijpassende LCZ is gekozen. Dit gebeurt door LCZ uit Stewart en Oke (2012) en de definitie hiervan te vergelijken met de foto's van de onderzoeklocaties, genomen tijdens het veldbezoek. In Tabel 5 op de volgende pagina worden de bevindingen met betrekking tot de lokale gebiedseigenschappen uit Deelrapport A gepresenteerd.

Nr.	Onderzoekpunt	LCZ	Element hoogte (m)	Antropogene warmte (W/m)
1	Boomstructuur	B	3 - 15	0
2	Begraafplaats	9B	3 - 15	0 - 10
3	Spoor	E	<0,25	<50
4	Plein	8	43011	<50
5	Open groen	D	<1	0
6	Wegen	E5	0,25 - 25	<25
7	Bebouwing	2	3 - 15	<75

Tabel 5: Overzicht LCZ-waarden met daaraan gekoppelde gegevens.

4.2.4. Overzicht parameters

Tabel 6 geeft een totaaloverzicht van de invoerparameters voor het bodem-model. Per onderzoekpunt zijn achtereenvolgend de coördinaten, het bodemtype, de grondwaterstand, de bodemeigenschappen en de lokale gebiedseigenschappen weergegeven. Met deze invoerparameters wordt per onderzoeklocatie de bodemtemperatuur uitgerekend. In het bodem-model wordt hier dan ook nog een klimaatscenario aan toegevoegd. De resultaten van deze berekeningen worden in paragraaf 4.3 gepresenteerd en besproken.

Nr.	Onderzoekpunt	Coördinaten		Bodemtype	Gws - mv (cm)	Bodemeigenschappen			Lokale gebiedseigenschappen		
		X	Y			λ^1	ρ^2	Cp^3	LCZ ⁴	hRL ⁵	QF ⁶
1	Bomen	118953	489746	Klei	35	2,22	2000	1700	B	3 - 15	0
2	Begraafplaats	119350	489305	Zand, fijn	>300	0,75	1400	1143	9B	3 - 15	0 - 10
3	Spoor	119939	489188	Zand, grindhoudend	>175	0,5	1450	1103	E	<0,25	<50
4	Plein	119852	488862	Zand, matig fijn	118	1,73	1750	1257	8	3 - 10	<50
5	Open groen	119969	488939	Zand, slibhoudend	140	0,27	1250	1040	D	<1	0
6	Wegen	120362	489326	Zand, matig fijn	115	1,73	1750	1257	E5	0,25 - 25	<25
7	Bebouwing	121019	489117	Zand, matig grof	120	1,8	1900	1105	2	10 - 25	<75

¹ Warmtegeleidings-coëfficiënt W/m.K

² Soortelijke massa kg/ m³

³ Warmtecapaciteit J/kg.K

⁴ Local Climate Zone -

⁵ Element hoogte m

⁶ Antropogene warmte W/m²

Tabel 6: Overzicht invoerparameter benodigd voor bodem-model.

4.3. VERANDERING IN BODEMTEMPERATUUR

Voor de klimaatscenario's van 2006 en 2050 is de bodemtemperatuur, in stappen van een halve meter, tot een diepte van 2,0 meter onder het maaiveld doorgerekend. Het bodem-model berekent voor iedere dag van het jaar een gemiddelde bodemtemperatuur. In dit onderzoek ligt de focus echter op hittestress, daarom worden de maanden juni, juli en augustus uitgelicht.

De uitkomsten zijn opgedeeld in drie onderdelen. Als eerste worden de temperaturen van de verschillende onderzoeklocaties op verschillende dieptes naast elkaar gezet. Op basis daarvan wordt het warmteverloop in bodem voor de warmste en koudste onderzoeklocaties verder geanalyseerd. Als duidelijk is hoe de warmte zich in de bodem gedraagt, worden de bodemtemperaturen van 2006 en 2050 met elkaar vergeleken. Hierdoor ontstaat een duidelijk beeld van de opwarming van de bodem in de toekomst. Tot slot volgt er een overzichtstabel waarin duidelijk wordt in welke mate de bodem per onderzoeklocatie opwarmt. De gegevens uit deze tabel worden in een later stadium gebruikt om uitspraken te doen over de effecten op de bodemfuncties. De ruwe en onbewerkte data uit het model zijn te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

4.3.1. Temperatuurverloop bodemdiepten

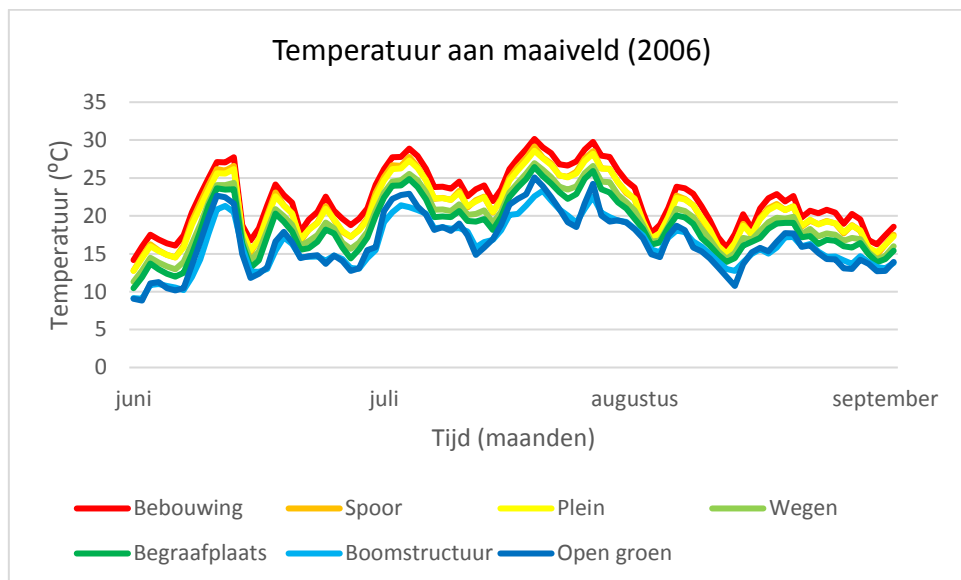
Door middel van grafieken is in beeld gebracht hoe de opwarming van de bodem bij de verschillende onderzoekpunten verloopt. Vanaf het maaiveld wordt een afspiegeling gemaakt van de opwarming van de bodem bij de onderzoekpunten. Hieronder worden de belangrijkste grafieken uitgelicht. Een totaaloverzicht van deze grafieken zijn terug te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

Onderstaand worden de temperaturen aan het maaiveld, op een halve meter, op een meter en op twee meter diepte getoond. Door op verschillende dieptes de bodemtemperatuur te tonen wordt het temperatuurverloop in de bodem inzichtelijk gemaakt. Ook wordt er steeds een verklaring gegeven voor de veranderingen in bodemtemperatuur.

Er wordt gekozen om hier alleen het 2006 scenario toe te lichten. In paragraaf 4.3.3. zal blijken dat het temperatuursverloop in de bodem in de huidige situatie hetzelfde is als in de toekomstige situatie, alleen de temperatuur is een paar graden hoger. Voor het verloop van de temperatuur in de bodem maakt het daarom niet uit welk scenario er wordt uitgelicht.

Temperatuur aan het maaiveld

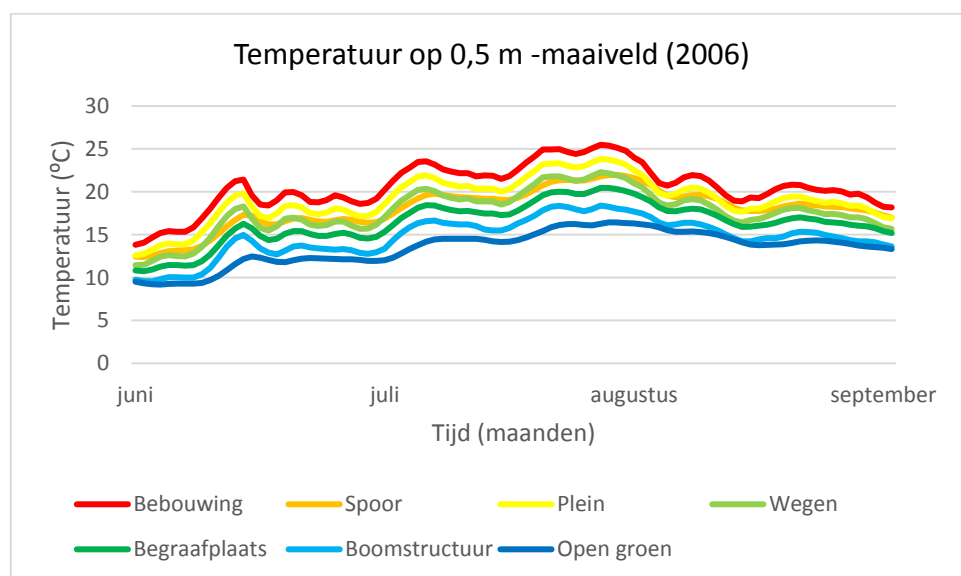
Aan het maaiveld hebben de lokale gebiedseigenschappen, zoals antropogene warmte en soort oppervlaktegebruik, grote invloed op de temperatuur. In Grafiek 1 is duidelijk te zien dat de temperaturen bij onderzoekpunten bebouwing, spoor, plein, wegen en begraaftplaats hoog oplopen. Dit komt doordat de antropogene warmte en verharde oppervlakken hieraan gekoppeld zijn. Begraaftplaats, bomen en open groen hebben niet tot nauwelijks invloed van antropogene warmte of verharde oppervlakken. Dit is terug te zien in de mindere mate van opwarming aan zowel het maaiveld als dieper in de bodem.



Grafiek 1: Temperatuur aan maaiveld. In het jaar 2006.

Temperatuur op een halve meter onder maaiveld

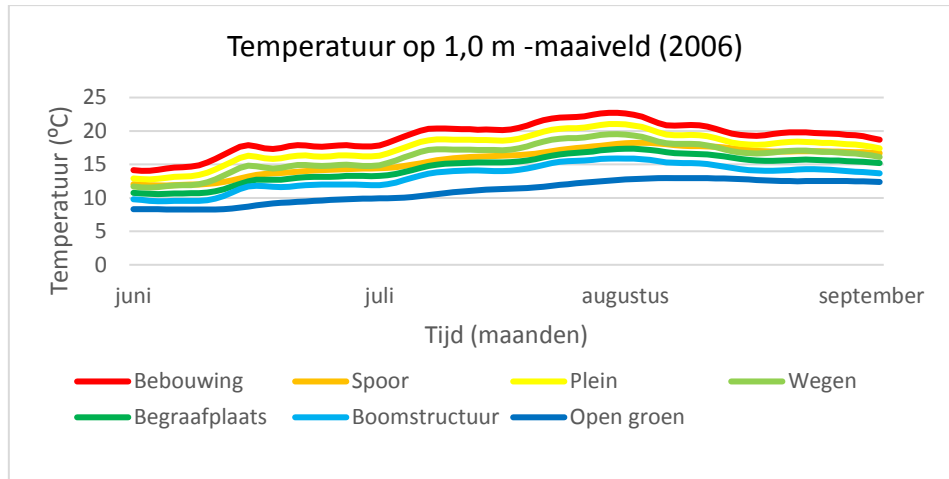
Op een halve meter diepte neemt de grilligheid van de temperatuur in vergelijking met die aan het maaiveld af, zie Grafiek 2. De pieken in temperatuur die aan het maaiveld nog duidelijk te zien waren, zijn op een halve meter diepte afgevlakt. De temperaturen aan het maaiveld worden dus niet één op één doorgezet naar de bodem, maar variëren met de diepte. Dit komt door het verschil in thermische bodemeigenschappen. Die bepalen hoe snel een bodem kan opwarmen en afkoelen.



Grafiek 2: Temperatuur op 0,5 meter diepte. In het jaar 2006.

Temperatuur op een meter onder maaiveld

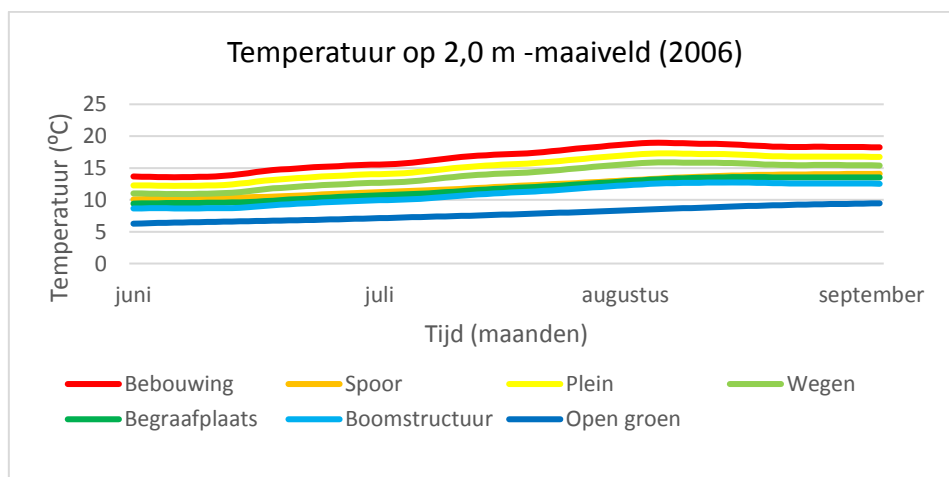
Naarmate er dieper in de bodem wordt gekeken is te zien dat de temperatuurf fluctuaties meer afnemen, zie Grafiek 3. Hier wordt duidelijk dat onderzoekpunt open groen af gaat wijken van de overige onderzoekpunten. Dit komt waarschijnlijk omdat dit onderzoekpunt een laag warmtegeleidingsvermogen heeft. Hierdoor kan de warmte, in vergelijking met de overige onderzoekpunten, slechter de bodem in trekken waardoor deze op een meter niet tot nauwelijks fluctuaties ondervindt.



Grafiek 3: Temperatuur op 1,0 meter diepte. In het jaar 2006.

Temperatuur op twee meter onder maaiveld

In Grafiek 4 wordt duidelijk dat de temperatuurverschillen tussen de onderzoekpunten op twee meter diepte ongeveer gelijk zijn gebleven. Dit geeft weer dat de temperatuur aan het maaiveld invloed heeft tot wel twee meter in de bodem. Op twee meter diepte ligt de temperatuur, ongeacht de bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen, ongeveer met dezelfde verhouding uit elkaar als aan het maaiveld. Waar aan het maaiveld verschillen van maximaal 10 °C tussen onderzoekpunten waren, is het maximale verschil op twee meter diepte ook ca. 10 °C. Het verloop van de temperatuur is alleen veel meer uitgevlakt. Een opvallend gegeven is dat de temperatuur aan het maaiveld bij onderzoekpunt spoor, in vergelijking met overige onderzoekpunten, minder wordt doorgezet in de bodem. Op twee meter diepte ligt de bodemtemperatuur van spoor namelijk bijna gelijk aan die van begraafplaats. Dit is te wijten aan het feit dat bij spoor een lage warmtegeleidingscoëfficiënt aanwezig is. Hierdoor geleidt deze bodem de warmte slecht.



Grafiek 4: Temperatuur op 2,0 meter diepte. In het jaar 2006.

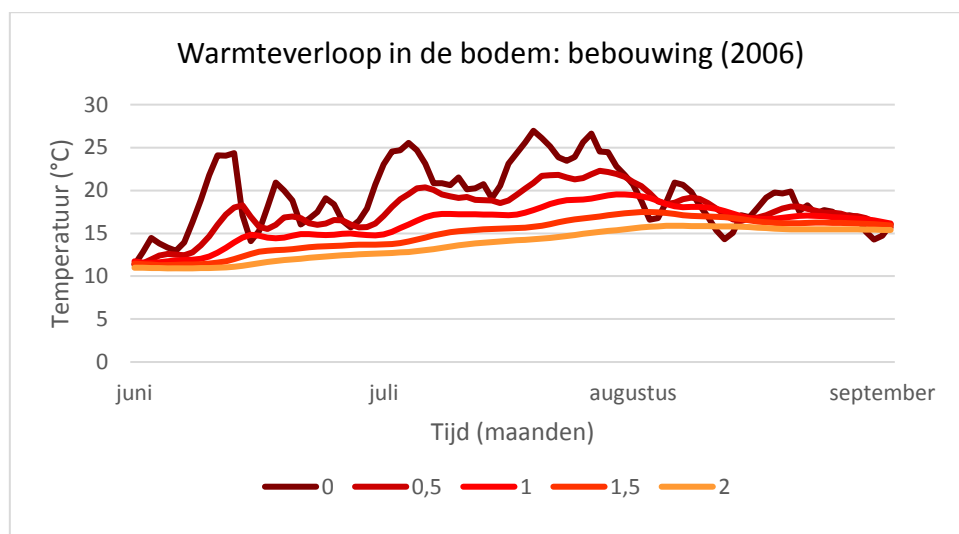
4.3.2. Warmteverloop extremen oppervlakgebruiken

Uit voorgaande tekst en grafieken is gebleken dat zich bij onderzoekpunt bebouwing de hoogste bodemtemperaturen bevinden. Bij onderzoekpunt open groen zijn de bodemtemperaturen het laagst. Om inzichtelijk te maken hoe de warmte in bodem verloopt worden deze twee onderzoekpunten uitgelicht. Aan de hand van grafieken worden uitspraken gedaan over het warmteverloop. Hierin worden eerder gedane uitspraken bevestigd of worden nieuwe bevindingen vastgesteld. De grafieken van de overige onderzoekpunten zijn terug te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

Bebouwing

Grafiek 5 toont het warmteverloop voor onderzoekpunt bebouwing in stappen van een halve meter onder maaiveld. Hoe lichter de kleur van de lijn, hoe dieper de lijn zich in de bodem bevindt. Wat in de grafiek duidelijk naar voren komt is dat de piektemperaturen die aan het maaiveld bereikt worden, in mindere mate in bodem zijn terug te vinden. Naarmate de warmte dieper rijkt, vlakken de hogere piek temperaturen geheel weg. Het temperatuurverschil aan het maaiveld in de drie zomer maanden bedraagt maximaal 15 °C, terwijl dit op 1 meter diepte nog maar 8 °C is, en op 2 meter diepte nog 5 °C. Ook wordt de warmte in de bodem langer vastgehouden. Waar er in de bovengrond relatief koudere perioden voor kunnen komen, zijn deze in diepere bodemlagen nauwelijks terug te vinden.

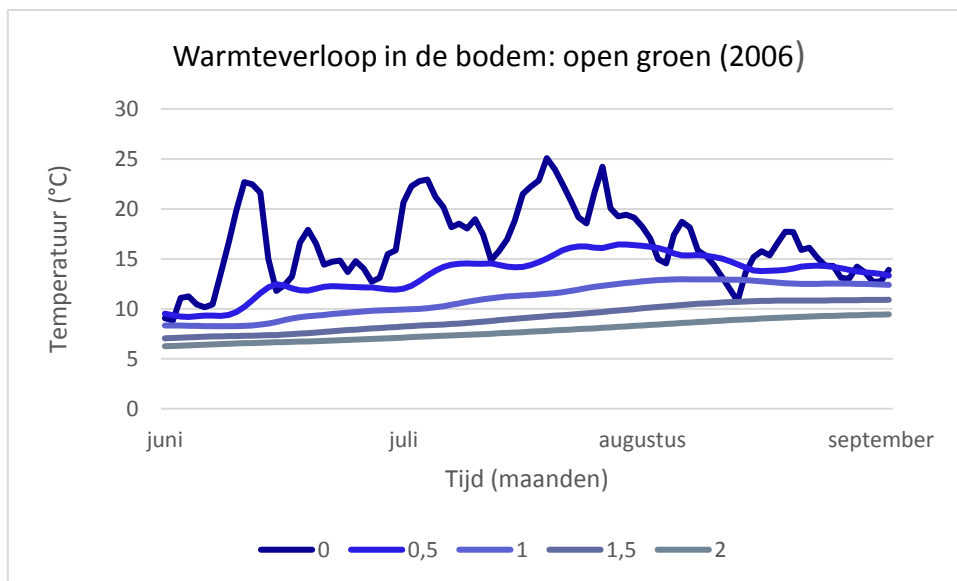
Een ander punt wat duidelijk terugkomt in de grafiek is de vertraagde opwarming van de bodem. De warmere perioden bovengronds zijn in de bodem pas enkele dagen later terug te zien. Dit is duidelijk te zien bij de temperaturen van begin augustus. Hier daalt de temperatuur aan het maaiveld sterk, terwijl de temperatuur in de bodem nog steeds stijgt. Ook de mate waarmee de bodem warmte doorgeeft wordt bij grotere diepte kleiner. Dit is te zien aan de onderlinge afstand tussen de lijnen in de grafiek. Naarmate de diepte toeneemt neemt de onderlinge afstand af.



Grafiek 5: Warmteverloop in de bodem per 0,5 meter min maaiveld voor het oppervlakgebruik bebouwing. In het jaar 2006.

Open groen

Grafiek 6 toont het warmteverloop voor onderzoekpunt open groen in stappen van een halve meter onder maaiveld. Hoe lichter de kleur van de lijn, hoe dieper de lijn zich in de bodem bevindt. De waarnemingen die bij onderzoekpunt bebouwing reeds beschreven zijn, zijn tevens terug te vinden in de grafiek met open groen. Wat het meest opvalt in vergelijking met de grafiek van bebouwing is de mate waarin de warmte wordt doorgegeven. In de grafiek met onderzoekpunt bebouwing is te zien dat de bovengrondse temperatuur enigszins terugkomt in de bodem. Dit is bij onderzoekpunt open groen niet het geval. Hier is het maximale temperatuurverschil over de drie maanden op 2 meter diepte 3 °C, op 1 meter diepte 4 °C terwijl dit aan het maaiveld ruim 16 °C is.

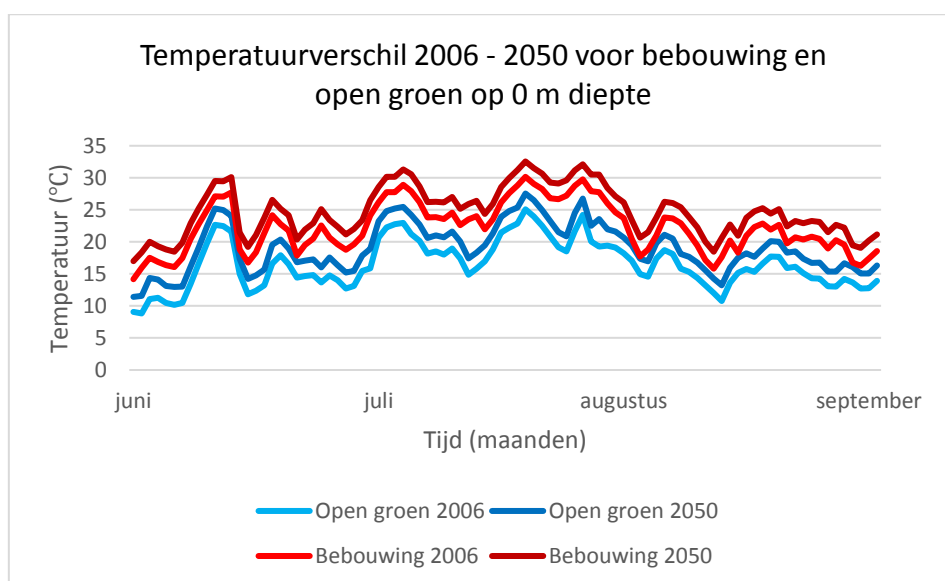


Grafiek 6: Warmteverloop in de bodem per 0,5 meter min maaiveld voor het oppervlaktegebruik open groen. In het jaar 2006.

4.3.3. Temperatuurverschil 2006 en 2050

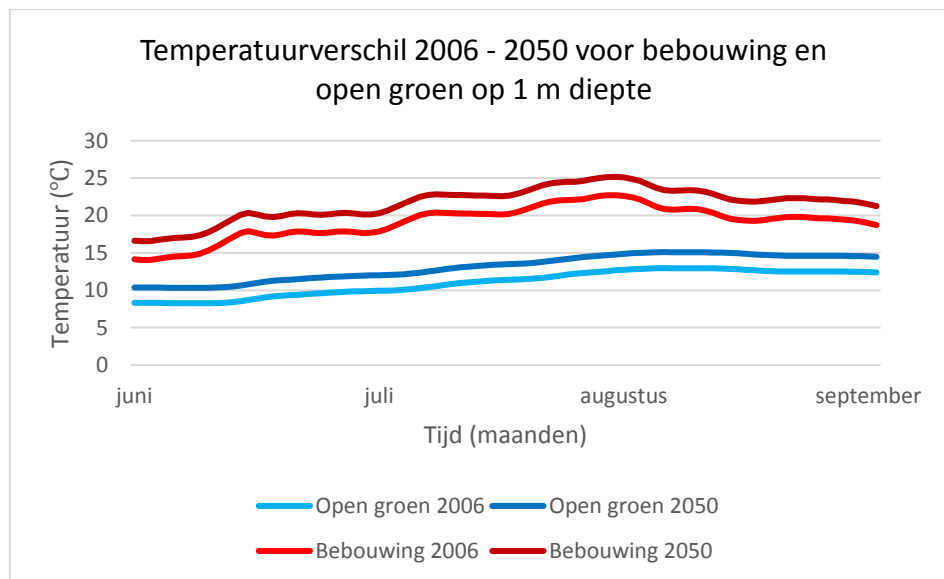
Om inzichtelijk te maken hoe de bodemopwarming verandert in de toekomst (2050) ten opzichte van de huidige situatie (2006) worden onderzoekpunten bebouwing en open groen uitgelicht. Vanaf het maaiveld wordt per meter diepte een grafiek getoond, tot een diepte van twee meter min maaiveld. In totaal worden er dus drie grafieken gepresenteerd en worden de bevindingen toegelicht. De grafieken en data van de overige onderzoekpunten zijn terug te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

Uit Grafiek 7 zijn een aantal conclusies te trekken. Als eerste is het eerdergenoemde verschil tussen de maaiveldtemperatuur van open groen en de maaiveldtemperatuur van bebouwing, het temperatuurverschil tussen de oppervlaktegebruiken bedraagt gemiddeld 5,5 °C. Dit komt hoogst waarschijnlijk door de verschillende warmtegeleidende vermogens van de bodems. Het gemiddelde temperatuurverschil tussen de 2006 en 2050 situatie bedraagt voor beide oppervlaktegebruiken 2,5 °C.

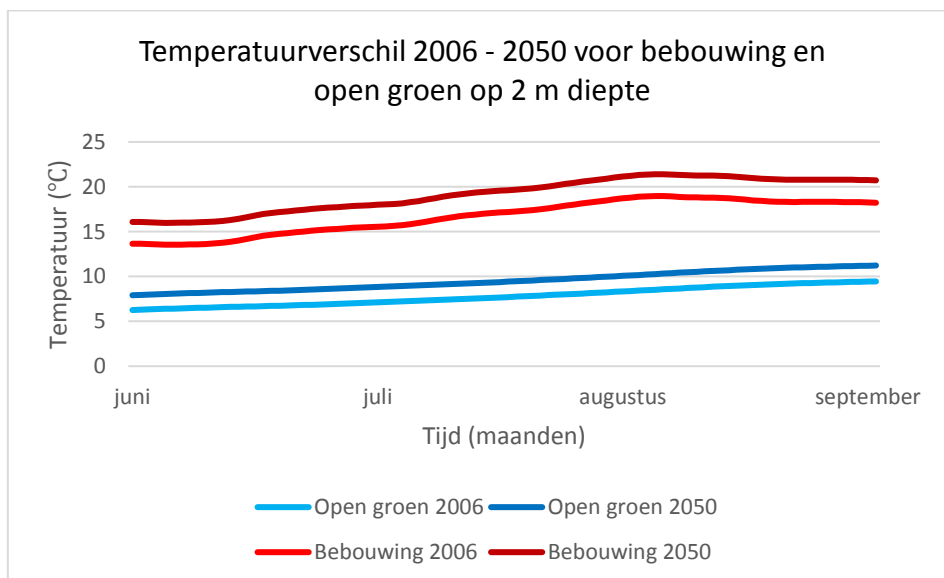


Grafiek 7: Temperatuurverschil 2006 - 2050 voor bebouwing en open groen op 0 m diepte.

Eerdergenoemde mate van opwarming gaan tevens op voor diepten 1,0 en 2,0 meter min maaiveld, te zien in Grafiek 8 en Grafiek 9. Het gemiddelde temperatuurverschil op 1 meter diepte tussen 2006 en 2050 bedraagt bij oppervlakgebruik bebouwing nog steeds 2,5 °C. Bij oppervlakgebruik open groen is dit gedaald naar 2,1 °C. Op 2 meter diepte zijn de temperatuurverschillen respectievelijk 2,4 en 1,7 °C. Ook neemt het temperatuurverschil tussen open groen en bebouwing toe. Waar dit aan het maaiveld nog 5,5 °C bedraagt wordt dit op 1 meter diepte 7 °C en op 2 meter diepte al ruim 9 °C. Hieruit blijkt dat het fenomeen hittestress wel degelijk effect heeft op de bodemtemperatuur. Doordat de temperatuur in de bodem bij de verharde oppervlakken hoger zijn, en hoger worden, dan bij de niet verharde oppervlakken.



Grafiek 8: Temperatuurverschil 2006 - 2050 voor bebouwing en open groen op 1,0 m diepte.



Grafiek 9: Temperatuurverschil 2006 - 2050 voor bebouwing en open groen op 2,0 m diepte.

4.3.4. Overzichtstabel bodemtemperaturen

In Tabel 7 worden de uitkomsten uit het bodem-model gepresenteerd. Het model geeft voor ieder onderzoekpunt per halve meter in de bodem een bodemtemperatuur in graden Celsius. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen de huidige situatie (2006) en de toekomstige situatie (2050).

De temperaturen bevinden zich in de 2050 scenario beduidend hoger dan in de 2006 scenario. Hieruit is op te maken dat het klimaat een belangrijke rol speelt in de bodemopwarming. De hoogste gemiddelde dagtemperatuur bodemtemperatuur gemiddeld over de drie zomerse maanden wordt dan ook in de 2050 situatie bereikt bij oppervlakgebruik bebouwing, namelijk 32,6 °C aan het maaiveld. De laagste gemiddelde dagtemperatuur bodemtemperatuur over de 3 zomer maanden is bereikt in 2006 en bedraagt 7,8 °C, en is aanwezig bij oppervlakgebruik open groen op een diepte van 2,0 meter onder maaiveld. Het verschil tussen de gemiddelde temperatuur en de maximale temperatuur neemt af naarmate de temperatuur dieper in de bodem trekt.

Nr	Onderzoekpunt	Diepte (m - mv)	2006		2050	
			Gemiddeld	Maximaal	Gemiddeld	Maximaal
1	Boomstructuur	0,0	16,4	23,3	18,9	25,8
		0,5	14,8	18,4	17,2	20,9
		1,0	13,3	15,9	15,7	18,4
		1,5	12,0	14,1	14,4	16,5
		2,0	10,9	12,7	13,3	15,1
2	Begraafplaats	0,0	18,6	26,5	21,1	28,9
		0,5	16,4	18,4	18,8	22,9
		1,0	14,6	15,9	16,9	19,7
		1,5	13,0	15,1	15,3	17,4
		2,0	11,7	13,6	13,9	15,8
3	Spoor	0,0	20,9	29,2	23,4	31,5
		0,5	18,0	22,0	20,4	24,4
		1,0	15,6	18,2	17,9	20,5
		1,5	13,7	15,7	15,8	17,8
		2,0	12,1	14,1	14,1	16,2
4	Plein	0,0	20,8	28,6	23,4	31,0
		0,5	19,1	23,8	21,6	26,3
		1,0	17,6	21,0	20,1	23,5
		1,5	16,3	17,5	18,8	21,4
		2,0	15,2	17,3	17,6	19,7
5	Open groen	0,0	16,6	25,1	19,1	27,6
		0,5	13,5	16,4	15,8	18,8
		1,0	11,0	13,0	13,1	15,1
		1,5	9,1	10,9	11,0	12,8
		2,0	7,8	9,5	9,5	11,2
6	Wegen	0,0	19,4	27,0	21,9	29,4
		0,5	17,7	22,3	20,2	24,7
		1,0	16,2	19,5	18,7	22,0
		1,5	14,9	17,5	17,4	19,9
		2,0	13,8	15,9	16,2	18,3
7	Bebouwing	0,0	22,3	30,2	24,8	32,6
		0,5	20,6	25,5	23,1	27,9
		1,0	19,1	22,7	21,6	25,2
		1,5	17,8	20,6	20,3	23,1
		2,0	16,7	19,0	19,6	21,4

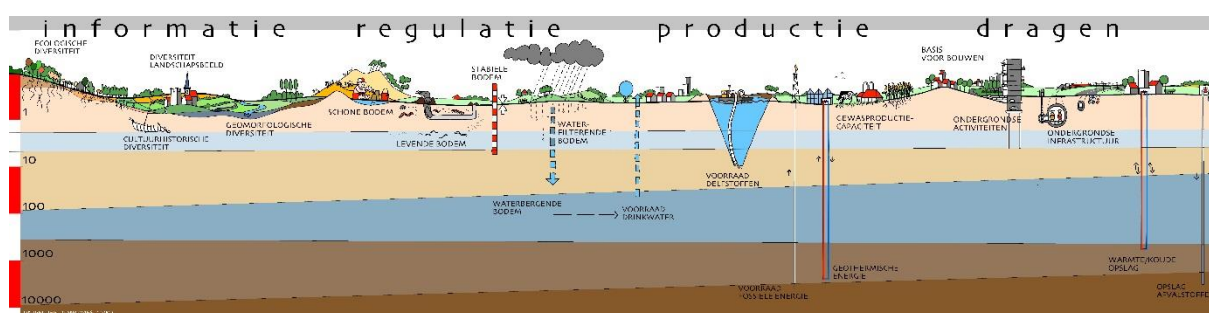
Tabel 7: Overzicht tabel temperatuurwaarden.

4.4. EFFECTEN VAN BODEMOPWARMING OP DE BODEMFUNCTIES

In dit hoofdstuk worden de effecten van bodemopwarming, zoals deze in Tabel 7 zijn weergegeven, op de verschillende bodemfuncties kenbaar gemaakt. Hiervoor moeten eerst een overzicht ontstaan van de verschillende bodemfuncties. Daarom worden eerst de bodemfuncties toegelicht en wordt het belang ervan verwoord. Vervolgens wordt aangegeven welke van deze bodemfuncties er aanwezig zijn op de onderzoeklocaties. Als laatste worden de effecten, als gevolg van eerder vastgestelde bodemopwarming, op de bodemfuncties die aanwezig zijn in het casusgebied beschreven.

4.4.1. Bodemfuncties

Zoals Figuur 7 toont aan dat de vier hoofdfuncties worden onderverdeeld in verschillende bodemfuncties. Onder de figuur wordt een korte beschrijving gegeven voor iedere hoofdfunctie waarna in tabelvorm wordt aangegeven welke bodemfuncties daaraan gekoppeld zijn. De tabellen lichten voor iedere bodemfunctie ook de functie en het belang uit. Een overzicht van de bodemfuncties in tabelvorm is terug te vinden in Bijlage 1: Bodemfuncties.



Figuur 7: Indeling bodemfuncties (Dauvellier, 2009)

Draagfuncties

Er zijn vier verschillende soorten draagfuncties, namelijk: draagkracht om te bouwen, ondergronds bouwen, buisleidingen en kabels, leidingen en riolering. Ze dienen voor het opvangen en ondersteunen van materie en energie die de samenleving produceert in en op de ondergrond. In Tabel 8 worden de draagfuncties nader toegelicht.

Draagfunctie	Wat	Belang
Draagkracht om te bouwen	Duidt op de mate waarin de ondergrond gevoelig is voor zetting. Treedt op doordat de ondergrond belast wordt door bijv. gewicht van bouwwerken.	Schade aan gebouwen, wegen en ondergrondse infrastructuur. Nieuwbouwprojecten vaak op zettingsgevoelige bodems.
Ondergronds bouwen	Het creëren van ondergrondse ruimte voor gebruik van menselijke activiteit.	Aangenamere ruimtelijke kwaliteit bovengronds.
Kabels, leidingen en riolering	Onder maaiveld gelegen infrastructuur.	Gebruikers voorzien van gas, water, licht, verwarming, etc.
Buisleidingen	Ondergrondse leidingen van regionaal/internationaal belang. Zoals aardgas, chemicaliën of olieproducten.	Leveringszekerheid van belangrijke grondstoffen en vloeistoffen. Gevaar en onnodige kosten als gevolg van graafschade of zettingen.

Tabel 8: Draagfuncties

Productiefuncties

Er zijn vijf verschillende productiefuncties, namelijk: gewasproductie, voorraad drinkwater, voorraad grondwater, warmte koudeopslag en geothermie. Deze functies leveren materie en energie uit de ondergrond aan de samenleving. In Tabel 9 worden de productiefuncties nader toegelicht.

Productiefuncties	Wat	Belang
Gewasproductie	Capaciteit van de bodem voor productie van gewassen bij beperkte bemesting en emissies naar het milieu.	Hogere opbrengsten met beperkte bemesting.
Voorraad drinkwater	Bruikbaar zoetwater van voldoende kwaliteit voor bereiding drinkwater.	Volksgesondheid. 70% van het drinkwater wordt gewonnen uit het grondwater.
Voorraad grondwater	Hoeveelheid water die zich in de ondergrond bevindt.	Draagkracht, plantengroei, bodemleven, niet verdrogen van natuur. Grondstof voor landbouw en industrie.
Warmte koude opslag	Maakt gebruik van de capaciteit van bodem en grondwater om warmte of koude vast te houden.	Energiebesparing, verduurzaming.
Geothermie	Warme watervoerende lagen worden benut voor verwarmen van o.a. gebouwen.	Energiebesparing, verduurzaming.

Tabel 9: Productiefuncties

Informatiefuncties

Er zijn vier verschillende informatiefuncties, namelijk: landschappelijke diversiteit, ecologische diversiteit, aardkundige waarde en archeologische waarde. Deze functies leveren en houden informatie vast. In Tabel 10 worden de informatiefuncties nader toegelicht.

Informatiefunctie	Wat	Belang
Archeologische waarde	Overblijfselen van menselijke activiteiten uit het verleden.	Geschiedenis geeft ruimtelijke identiteit. Archeologische waarden zijn onvervangbaar.
Aardkundige waarde	Natuurlijke variatie in aardoppervlak van geo-, geohydro-, geomorfologische en bodemkundige verschijnselen.	Belevingswaarde, kwaliteit natuur en landschap. Aardkundige waarden zijn vaak onvervangbaar.
Landschappelijke diversiteit	Wordings- en cultuurgeschiedenis	Belevingswaarde en identiteit ruimte. Schept voorwaarden voor biodiversiteit.
Ecologische diversiteit	Bondgenootschap tussen het bodem- en watersysteem en flora levert ecologische diversiteit die de soortenrijkdom in stand houdt.	Instandhouding van soortenrijkdom en verbetering van de natuurwaarden.

Tabel 10: Informatiefuncties

Regulatiefuncties

Er zijn zes verschillende regulatiefuncties, namelijk: schone en veilige bodem, levende bodem, stabiele bodem, waterbergende bodem, waterfilterende bodem en koolstofbindende bodem. Deze functies reguleren de materie, energie en informatiestromen in onze leefomgeving. In Tabel 11 worden de regulatiefuncties nader toegelicht.

Regulatiefuncties	Wat	Belang
Schone en veilige bodem	Bodem vrij van verontreinigingen en niet gesprongen explosieven.	Onaanvaardbare risico's voor de mens. Minder gebruiksmogelijkheden van de bodem.
Levende bodem	Het ecologische systeem in de bodem met ontelbare organismen.	Levert ecosysteem diensten zoals afbraak van organisch materiaal en verontreinigingen.
Stabiele bodem	De mate waarin de bodem beweegt is afhankelijk van de stabiliteit van de bodem.	Schade aan gebouwen, wegen, etc. Als gevolg van bodemdaling, kwel, gaswinning, etc.
Waterbergende bodem	Mogelijkheid water onder maaiveld te bergen. Water moet in de bodem kunnen infiltreren.	Op peil houden gws, voeden bodemleven. Voorkomen wateroverlast, water-op-straat.
Waterfilterende bodem	Grondwater ontdoen van verontreinigingen of verzilting.	Voorkomen verontreinigingen in de bodem. Betere waterkwaliteit voor o.a. natuur.
Koolstofbindende bodem	Vermogen en mogelijkheid om o.a. CO ₂ vast te houden.	Verbetering voor klimaat, voedselproductie en waterbufferend vermogen.

Tabel 11: Regulatiefuncties

4.4.2. Bodemfuncties in de Spaarndammerbuurt

In deze paragraaf wordt achterhaald welke bodemfuncties uit paragraaf 4.4.1. er in het casusgebied aanwezig zijn. De aanwezigheid van de bodemfuncties wordt achterhaald tot een diepte van twee meter min maaiveld. In Tabel 12 is per onderzoekpunt met geel weergegeven welke bodemfuncties er aanwezig zijn. Indien een cel geheel geel is, is de bodemfunctie over de gehele eerste twee meter aanwezig, tenzij anders aangegeven. Voor bodemfuncties kabels, leidingen en riolering zijn letters toegevoegd in de tabel. Deze letters staan voor afkortingen die in Tabel 13 zijn toegelicht. De bodemfuncties met betrekking tot grondwater zijn toegelicht met cijfers, deze staan voor de grondwaterdiepten. Onder de tabel wordt op basis van de vier hoofdfuncties beschreven waarom bodemfuncties wel of niet aanwezig zijn op het desbetreffende onderzoekpunt.

Hfd.	Bodemfuncties	Onderzoekpunten						
		Boomstructuur	Begraafplaats	Spoor	Plein	Open groen	Wegen	Bebouwing
Draag	Draagkracht om te bouwen							
	Ondergronds bouwen							
	Kabels, leidingen			D, SP, W	D, SP, R, W, G	D, SP, R	D, SP, R, W, G	D, SP, R, W, G
	Buisleidingen							
Productie	Warmte/koude opslag							
	Gewasproductie							
	Voorraad drinkwater							
	Voorraad grondwater	> 0.35		> 1.75	> 1.18	> 1.40	> 1.15	> 1.20
	Geothermie							
Informatie	Archeologische waarden							
	Aardkundige waarden							
	Landschappelijke diversiteit							
	Ecologische diversiteit							
Regulatie	Schone en veilige bodem							
	Levende bodem							
	Stabiele bodem							
	Waterbergende bodem					< 1.40		
	Waterfilterende bodem							
	Koolstofbindende bodem							

Tabel 12: Aanwezigheid en diepte van bodemfuncties bij de onderzoekpunten

Draagfuncties

Constructies dienen op draagkrachtige bodems te worden gebouwd, dit voor de stabiliteit van de constructie. Bij onderzoekpunt spoor, plein wegen en bebouwing wordt de ondergrond gebruikt als draagfunctie. Bodemfunctie ondergronds bouwen vindt bij onderzoekpunt bebouwing plaats in de vorm van kelders. Bij de overige onderzoekpunten worden geen objecten in de ondergrond gebouwd die bijdragen aan de ruimtelijke kwaliteit bovengronds. Via een KLIC-melding zijn de kabels en leidingen inzichtelijk gemaakt, zie Bijlage 8: Overzicht KLIC. Hieruit blijkt dat buisleidingen van nationaal of internationaal niveau zijn niet aanwezig in het casusgebied. Alle kabels en leidingen zijn op lokale schaal.

Afkorting	Beschrijving	Minimale diepte
D	Datakabels	0.60
G	Gas	0.80
SP	Spanning	0.60
W	Water	1.00
R	Riolering	0.80

Tabel 13: Type kabels, leidingen en rioleringen met bijgaande afkorting en diepte (Repository)

Productiefuncties

Bij de gemeente Amsterdam zijn overzichtskaarten met betrekking tot warmte koudeopslag en geothermie beschikbaar. Tevens heeft Waternet dit voor de locaties met voorraad drinkwater. Deze drie bodemfuncties zijn allen niet aanwezig in de Spaarndammerbuurt (Amsterdam G. , Energie uit bodem en water, sd). Bij de onderzoekpunten boomstructuur, begraafplaats en open groen is er capaciteit voor productie van gewassen. Dit is dan ook terug te zien in begroeiing aan het oppervlak. De overige onderzoekpunten zijn aan het oppervlak afgedekt waardoor de capaciteit voor productie

niet meer aantoonbaar naar voren komt. De bodemfunctie voorraad grondwater is, met uitzondering van de begraafplaats, op alle onderzoekpunten vanaf de grondwaterstand aanwezig.

Informatiefuncties

De bodems in het casusgebied zijn veelal opgebracht en aangelegd waardoor archeologische waarde in de bovenste lagen van de bodem zijn uitgesloten, en er ook geen landschappelijke diversiteit aanwezig is in de bodem. Uitzondering hierin is onderzoekpunt boomstructuur. Hier groeien al tijdenlang bomen en struiken. Mogelijk zijn hier dus sporen van menselijke activiteiten uit het verleden aanwezig in de bodem. Alle onderzoekpunten zijn al dermate bewerkt in het verleden dat er geen aardkundige waarde in de vorm van stuwwallen e.d. is aan te treffen in de eerste twee meter. Begraafplaats is een onderzoekpunt waar cultuurgeschiedenis in de bodem wordt aangetroffen. Niet geïnventariseerd is of de overige punten historische waarden in de bodem bevatten in de vorm van historische bouwresten of funderingen. Onderzoekpunten boomstructuur, begraafplaats en open groen bevatten een diversiteit aan bodemleven en voedselrijkdom. Dit wordt aangetoond doordat er gewassen aan het oppervlak groeien. De overige oppervlakken zijn dermate bedekt dat deze functies nauwelijks aanwezig zijn.

Regulatiefuncties

Bodemloket geeft voor Amsterdam aan welke plekken schoon zijn van vervuiling, welke plekken nog in afwachting zijn van een procedure en welke plekken gesaneerd zijn. Onderzoekpunten boomstructuur en bebouwing zijn momenteel nog in afwachting van een procedure. Om deze reden wordt aangenomen dat deze vervuild zijn. De overige punten zijn schoon (Bodemloket, sd). Levende bodem bevindt zich op onderzoekpunten waar zich ecosystemen kunnen bevinden. Dit zijn locaties waar open bodem en begroeiing aanwezig is. Dit zijn dus boomstructuur, begraafplaats en open groen. De meest stabiele bodems zijn de zandgronden. De minder stabiele bodems betreffen de klei- en veengronden. Enkel onderzoekpunt boomstructuur bestaat uit een klei bodem, deze wordt als enige voor instabiel aangezien (Ruimtexmilieu, Ondergrond kwaliteiten, 2017). Waterbergend vermogen is alleen mogelijk als het oppervlak niet verhard is, en de grondwaterstand voldoende diep is. Dit is enkel het geval bij begraafplaats en open groen tot aan de grondwaterstand. Binnen het casusgebied zijn er geen plekken aanwezig waar water opzettelijk wordt gefilterd door de bodem. Wel zijn er bodems aanwezig die de mogelijkheid hebben om koolstof te binden. Dit is mogelijk doordat deze een hoog organische stofgehalte hebben. De bodems bij onderzoekpunten boomstructuur en open groen zijn mogelijk koolstofhoudend vanwege de aanwezigheid van klei en slib.

4.4.3. Effecten op de bodemfuncties

In deze paragraaf worden de effecten van verhoging in bodemtemperatuur op de bodemfuncties die aanwezig zijn in het casusgebied inzichtelijk gemaakt. Er wordt hier uitgegaan van de meest extreme bodemopwarming zoals deze is berekend voor het jaar 2050. Per bodemfunctie wordt onderzocht welke effecten deze ondervindt. Tabel 12, uit vorige paragraaf geeft aan welke bodemfuncties op welk onderzoekpunt aanwezig is. Voor de leesbaarheid wordt dit per bodemfunctie in deze paragraaf nog eens aangegeven. Ter herinnering, onderzoekpunt boomstructuur heeft een kleibodem, terwijl de overige onderzoekpunten een zandig bodemtype hebben. Dit is al in eerder stadium behandeld, zie paragraaf 2.4 Bodemeigenschappen.

Bij het onderzoek naar de effecten wordt duidelijk dat de meeste bodemfuncties niet los van elkaar kunnen worden gezien. Wanneer er een effect optreedt bij bodemfunctie y kan dit ook gevolgen hebben voor bodemfunctie x. Zoals zal blijken is bodemfunctie Voorraad grondwater een bepalende factor op vele effecten. Wanneer van toepassing wordt het effect van de voorraad grondwater op de desbetreffende bodemfunctie dan ook beschreven. Tabel 14 geeft een overzicht waarin duidelijk

wordt bij welke onderzoekpunten de bodemfuncties effecten ondervinden als gevolg van bodemopwarming.

Ter attentie: Onderstaande uitspraken zijn op basis van interviews met deskundigen geformuleerd. Er heeft geen literatuuronderzoek op plaatsgevonden. De aantekeningen die zijn gemaakt tijdens de interviews zijn terug te vinden in Bijlage 7: Achtergrond informatie.

Draagkracht om te bouwen

Betrekking op onderzoekpunten: spoor, plein, wegen en bebouwing.

Enkel een verhoging in bodemtemperatuur zal geen effect hebben op de draagkracht om te bouwen.

Wel is het mogelijk dat de grondwaterstand zakt als gevolg van een verhoogde bodemtemperatuur. Dit kan op twee manieren effecten hebben op de draagkracht. Ten eerste zorgt een afname van de grondwaterstand voor een daling van de waterspanning en een verhoging van de korrelspanning. Dit heeft als gevolg dat er zettingen op kunnen treden. Door deze daling van de bodem neemt de draagkracht af. Het tweede effect rust op het feit dat Amsterdam voor grote delen op houten palen is gefundeerd. Als deze palen droog komen te staan als gevolg van een grondwaterstands daling kunnen deze gaan rotten. Hierdoor kan de draagkracht afnemen of zelfs helemaal wegvallen. (Wit, 2017)

Ondergronds bouwen

Betrekking op onderzoekpunt: bebouwing.

Enkel een verhoging in bodemtemperatuur zal geen effect hebben op de ondergrondse bouwwerken.

Wel is mogelijk dat de temperatuur in de ondergrondse constructies stijgt naarmate de bodemtemperatuur toeneemt. Dit komt door doordat de ondergrondse bebouwing (een gedeelte) van de bodemtemperatuur overneemt. Het effect van een verkoelende kelder zal hierdoor verminderd worden. (Heide, 2017)

Kabels, leidingen en riolering

Betrekking op onderzoekpunten: spoor, plein, open groen, wegen en bebouwing.

Een verhoging van de bodemtemperatuur heeft effect op deze bodemfunctie. Bij kabels, leidingen en riolering is dit effect verschillend. Hieronder worden daarom de effecten op deze drie vormen van ondergrondse infrastructuur apart toegelicht.

Bij kabels wordt er onderscheid gemaakt tussen datakabels en spanningskabels. Datakabels bestaan voornamelijk uit glasvezel. Glasvezel is bestand tegen opwarming zoals deze voorkomt in de bodem. Op datakabels wordt dus geen effect verwacht. Spanningskabels ondervinden mogelijk wel effecten. Door verhoging van de bodemtemperatuur kan de warmte vanuit de spanningskabel minder goed worden afgegeven aan de bodem. Hierdoor kan de spanningskabel mogelijk te veel opwarmen wat voor storingen kan zorgen. (Jasperse, 2017)

Bij leidingen wordt er onderscheid gemaakt tussen gasleidingen en waterleidingen. Gasleidingen bestaan voornamelijk uit ijzer en/of kunststof (PE of pvc). Bij het aanleggen van nieuwe gasleidingen wordt rekening gehouden met het uitzetten en krimpen als gevolg van temperatuurschommelingen. Oudere leidingen zijn hier mogelijk niet op berekend. Hierdoor kan het zo zijn dat door het uitzetten scheuren ontstaan met lekkages als gevolg. Er kunnen dus negatieve effecten optreden bij de gasleidingen.

Bij waterleidingen is er mogelijk effect op de kwaliteit van het drinkwater. Volgens het Waterleidingbesluit mag de temperatuur van het water in het leidingnet niet hoger zijn dan 25 °C. Dit

omdat bij deze temperatuur de hoeveelheid bacteriën in het water als te veel wordt beschouwd. Echter de bacteriegroei start al bij lagere temperaturen, maar dit wordt als acceptabel beschouwd. Op de onderzoeklocaties komen op diepte van de drinkwaterleidingen (hiervoor is 1 meter min maaiveld aangehouden) geen temperaturen boven de 25 °C voor. Er worden dus geen negatieve effecten verwacht. Pas wanneer drinkwaterleidingen ondieper dan 0,5 m maaiveld liggen wordt de grens van 25 °C overschreden. (Molen M. v., Pieterse-Quirijns, Donocik, & Smulders, 2009)

Een stijging in de bodemtemperatuur zal zorgen voor een verhoogde temperatuur in de riolering. Hierdoor stijgt ook de temperatuur van het afvalwater. Deze stijging in temperatuur zorgt ervoor dat bacteriegroei in het afvalwater expliciet kan toenemen. Gevolg hiervan is een vermeerdering van de hoeveelheid rioolgas. Methaan, waterstofsulfide en koolstofdioxide zijn de hoofdbestanddelen in dit gas. Vanwege een laag zuurstofgehalte in de riolen wordt waterstofsulfide omgezet in zwavelzuur. Dit zwavelzuur kan de betonnen rioolleidingen aantasten wat tot lekkages kan leiden. Dit is een negatief effect voor zowel de volksgezondheid als voor de bodemkwaliteit, wat door de bodemopwarming in de toekomst alleen maar versterkt wordt. (Jasperse, 2017)

De kabels, leidingen en rioleringen liggen in het casusgebied boven de grondwaterspiegel. Verlaging van de grondwaterspiegel als gevolg van bodemtemperatuurverhoging heeft dan ook geen effect op deze bodemfunctie.

Gewasproductie

Betrekking op onderzoekpunten: boomstructuur, begraafplaats en open groen.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zorgt voor een positief effect op de gewasproductie.

Door een verhoging in de bodemtemperatuur zullen chemische, fysische en biologische processen in de bodem worden versneld. Hierdoor is de bodem in staat meer voedingsstoffen voor de gewassen aan het oppervlak te produceren. Gevolg hiervan is dat de gewascapaciteit kan toenemen. (Muntjewerff, 2017)

Een verlaging van de grondwaterstand als gevolg van een verhoogde bodemtemperatuur zorgt ervoor dat de wortelzone zich uitbreidt. Niet alle gewassen zullen dit aankunnen waardoor deze mogelijk een watertekort krijgen en hierdoor plaatsmaken voor andere gewassen. (Muntjewerff, 2017)

Voorraad grondwater

Betrekking op onderzoekpunten: boomstructuur, spoor, plein, open groen, wegen en bebouwing.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zal een negatief effect hebben op de voorraad grondwater.

De voorraad grondwater staat gelijk aan de grondwaterspiegel. Daalt de grondwaterspiegel, dan daalt ook het voorraad grondwater. Een verhoogde bodemtemperatuur zal zorgen voor meer verdamping aan het oppervlak. Dit zorgt voor een afname van het vochtgehalte in de bodem, wat een daling in de grondwaterstand als gevolg heeft. De hoogste bodemtemperaturen zijn in de eerste meter te vinden. Hier zal het grondwater dan ook meer dalen dan op twee meter diepte, waar de bodemtemperatuur niet zo hoog wordt. Bodems met hoge grondwaterstanden zullen dus meer effecten ondervinden aan een verhoging in bodemtemperatuur dan bodems met een lage grondwaterstand. Ook is er een verschil tussen klei- en zandgronden. Door het grote poriëngehalte bij zand kan het water zich gemakkelijk verplaatsen. Water zal dan ook eerder verdampen uit een zandgrond, dan uit een kleigrond. In een kleigrond zitten de kleideeltjes veel dichter op elkaar waardoor er meer energie nodig is om verdamping te doen plaatsvinden. (Visser, 2017)

Archeologische waarden

Betrekking op onderzoekpunt: boomstructuur.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zal geen effect hebben op de archeologische waarde in de bodem.

Het is aannemelijk dat de eerste twee meter van de verzadigde Amsterdamse bodem archeologische waarden bevat, op plaatsen waar geen relatief recente ophoging of roering van de grond heeft plaatsgevonden. Een stijging in bodemtemperatuur zal geen direct effect hebben op de archeologische waarden. (Blom, 2017)

Een verlaging van de grondwaterstand als gevolg van een verhoogde bodemtemperatuur zorgt ervoor dat archeologische waarde in bodem droog kunnen komen te staan. Als organische materialen (zoals hout en leer) droog komen te staan, kunnen deze geheel worden afgebroken en zullen ze verdwijnen uit de bodem. Het proces hiervan staat beschreven bij bodemfunctie *Levende bodem*. (Blom, 2017)

Landschappelijke diversiteit

Betrekking op onderzoekpunt: begraafplaats.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zal geen effect hebben op de landschappelijke diversiteit.

Een verhoging van de bodemtemperatuur zal de natuurlijke en historische ontstaansgeschiedenis van het landschap niet aantasten. Landschappelijke kwaliteiten als strandwallen, kreekruigen of overvallen komen niet voor binnen het casusgebied en zullen tevens niet aangetast worden door een bodemopwarming van zoals dit onderzoek aantoon. (Huijsmans, 2017)

Ecologische diversiteit

Betrekking op onderzoekpunten: boomstructuur, begraafplaats en open groen.

Een verhoging in bodemtemperatuur zal een verschuiving in ecologische diversiteit veroorzaken.

De ecologische diversiteit hangt samen met bodemfunctie *Levende bodem*. Een verhoging in bodemtemperatuur zorgt ervoor dat bacteriën en schimmels harder kunnen gaan groeien. Bij dit proces komen meer voedingsstoffen vrij in de bodem. Hierdoor kan de soortenrijkdom toenemen en worden de natuurwaarden verbeterd. Wel kan het ook zo zijn dat bepaalde soorten deze verandering niet aankunnen, en zich mogelijk aanpassen of zelfs verdwijnen (Huijsmans, 2017)

Schone en veilige bodem

Betrekking op onderzoekpunt: boomstructuur en bebouwing.

Een verhoging in bodemtemperatuur zal een positief effect hebben op de organische verontreinigingen in de bodem.

Organische verontreiniging, dit zijn vervuilingen met koolstof en waterstofverbindingen, worden bij een verhoogde bodemtemperatuur sneller afgebroken. Dit komt omdat de micro-organismen, die deze afbraak veroorzaken, bij hogere temperaturen sneller functioneren. Door een verhoogde bodemtemperatuur neemt ook de verdamping toe. Deze toename in verdamping van verontreiniging zorgt voor een meer schone en veilige bodem. De overige verontreinigingen, die op basis van metalen zijn, breken niet af en zullen dus ook geen effect ondervinden van een verhoogde bodemtemperatuur. (Huijsmans, 2017)

Levende bodem

Betrekking op onderzoekpunt: boomstructuur, begraafplaats en open groen.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur heeft over het algemeen een positief effect op de levende bodem.

Het bodemleven leeft van afbraak van organische stof. De schimmels en bacteriën die zorgen voor de afbraak van organisch materiaal ondervinden een optimale bodemtemperatuur tussen de 20 en 25 °C. Een verhoging in bodemtemperatuur zorgt voor een broeierig effect waardoor de afbraak van organisch materiaal wordt geoptimaliseerd, en dus ook versneld. Ook is het zo dat de bodem dient als warmtebuffer. De bodemtemperatuur bereikt later de maximale temperatuur dan de temperatuur aan het oppervlak. Dit betekent dat het bodemleven ook pas in een later stadium extra wordt gestimuleerd in de vorm van een stijgende bodemtemperatuur. Hierdoor kan het zo zijn dat na een hittegolf nog voldoende voedingsstoffen in bodem worden geproduceerd, terwijl de temperatuur aan het oppervlak reeds is afgenomen. (Huijsmans, 2017) (Terlouw, sd)

Een indicator voor het bodemleven is de wormenactiviteit. Wormen leven veelal in de bovenste 40 centimeter van bodem. Hier zal de temperatuur het meest toenemen. De wormenactiviteit hangt samen met het vochtgehalte en de temperatuur van de bodem, waarbij een bodemtemperatuur tussen de 10 en 20 °C gewenst is. In de eerste 50 centimeter van de bodem komt de bodemtemperatuur boven de 20 °C uit. De wormen zullen hierdoor mogelijk diepere grondlagen opzoeken, in rustperiode, of zelfs doodgaan. Ook de mogelijk verlaagde grondwaterstand als gevolg van verhoogde bodemtemperatuur heeft een negatief effect op de wormenactiviteit. Wormen bestaan grotendeels uit water, wanneer de grond te droog wordt kunnen de wormen dit niet aan wat de dood als gevolg heeft. Dit zal echter alleen in de extreemste situaties voorkomen. Over het algemeen ondervindt de levende bodem positieve effecten aan de bodemopwarming. (Eekeren, Heeres, & Smeding, 2003)

Stabiele bodem

Betrekking op onderzoekpunt: boomstructuur.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zal geen effect hebben op de stabiliteit van de bodem.

Wel is het mogelijk dat door een verlaging in de grondwaterstand als gevolg van bodemopwarming de stabiliteit van de bodem afneemt. Wanneer een kleibodem opwarmt kan het watervolume in het poriegehalte van de bodem afnemen waardoor er kleischeuren kunnen ontstaan. Kleischeuren zorgen voor een instabiele bodem. Echter de grondwaterstand bij onderzoekpunt boomstructuur ligt dermate hoog dat er geen effecten met betrekking tot instabiliteit worden verwacht. (Muntjewerff, 2017)

Waterbergende bodem

Betrekking op onderzoekpunten: begraafplaats en open groen.

Een verhoging in enkel de bodemtemperatuur zal weinig tot geen effect hebben op het waterbergend vermogen.

Een verhoging van de bodemtemperatuur zal geen effect hebben op het waterbergend vermogen van een zandbodem. De structuur, en daarmee het waterbergend vermogen van een zandgrond, verandert niet bij het opwarmen van de zandkorrels. Een kleibodem kan daarentegen wel effecten ondervinden. Bij het uitdrogen van een kleibodem 'slaat deze dicht'. Dit wil zeggen dat de bodem zo is uitgedroogd dat het water aan het oppervlak eraf loopt en dus niet in de bodem wordt opgenomen. Dit wordt echter opgevangen door de kleischeuren. Deze zijn ontstaan in het uitdrogingsproces van de kleibodem. Het water zal hierin lopen waardoor het water toch wordt geborgen door de kleibodem.

De hoeveelheid water die een bodem uiteindelijk kan opnemen is afhankelijk van de grondwaterstand en het poriëngehalte. Hoe hoger de grondwaterstand, hoe minder waterbergend vermogen de bodem heeft. Voor het poriëngehalte geldt: hoe hoger het poriëngehalte, hoe groter het waterbergend vermogen. Ook is het mogelijk dat door het stijgen van de bodemtemperatuur de eigenschappen van de bodemsoort veranderen, waardoor mogelijk meer of minder water kan worden geborgen. Dit is echter een speculatie. (Visser, 2017) (Muntjewerff, 2017)

Koolstofbindende bodem

Betrekking op onderzoekpunten: boomstructuur en open groen.

Een verhoging van enkel de bodemtemperatuur zal geen effect hebben op het koolstofbindend vermogen van de bodem.

Wel is het zo dat een verlaging van de grondwaterstand, als gevolg van bodemopwarming, een negatief effect kan hebben op de koolstofbindende bodem. Het koolstof wat in het organisch materiaal zit opgeslagen kan in verzadigde toestand niet worden afgebroken. Wanneer de grondwaterstand zal dalen komt het organisch materiaal droog te staan. In deze toestand wordt het afgebroken door micro-organismen. Bij deze chemische reactie komt koolstofdioxide vrij. Dit proces is onomkeerbaar. Dit betekent dat wanneer de grondwaterstand daalt, het koolstofbindende vermogen van de bodem afneemt. (Wit, 2017)

Overzichtstabel

In Tabel 14 staan de onderzoeklocaties tegenover de bodemfuncties. Deze tabel presenteert voor ieder onderzoekpunt de diepte met bijbehorende bodemtemperatuur en de daaraan gekoppelde mate van opwarming. De mate van opwarming representeert de maximale bodemtemperatuur, minus de standaard van 11 °C.

De tabel toont voor iedere halve meter min maaiveld het effect per bodemfunctie. Hiervoor worden in de tabel worden drie kleuren gebruikt. Rood staat voor bodemfuncties die negatieve effecten ondervinden van de opwarming, groen voor bodemfuncties die positieve effecten ondervinden en grijs voor bodemfuncties die geen effecten ondervinden. Voor de witte cellen geldt dat de bodemfunctie niet voorkomt bij het oppervlaktegebruik op het betreffende onderzoekpunt. Het vaststellen van deze effecten is in deze paragraaf gebeurd. De aanwezigheid van bodemfuncties in de Spaarndammerbuurt is in paragraaf 4.4.2 behandeld.

Nr.	Onderzoek- punt	Diepte (m - mv)	Maximale bodem- temperatuur	Mate van opwarming	Bodemfuncties												
					Draagkracht om te bouwen	Ondergronds bouwen	Kabels, leidingen en rioleringen	Gewasproductie	Voorraad grondwater	Archeologische waarde	Landschappelijke diversiteit	Ecologische diversiteit	Schone en veilige bodem	Levende bodem	Stabiele bodem	Waterbergende bodem	Koolstofbindende bodem
1	Boomstructuur	0,0	25,8	14,8													
		0,5	20,9	9,9													
		1,0	18,4	7,4													
		1,5	16,5	5,5													
		2,0	15,1	4,1													
2	Begraafplaats	0,0	27,5	16,5													
		0,5	21,3	10,3													
		1,0	18,4	7,4													
		1,5	16,2	5,2													
		2,0	14,7	3,7													
3	Spoor	0,0	29,6	18,6													
		0,5	22,3	11,3													
		1,0	18,6	7,6													
		1,5	16,1	5,1													
		2,0	14,5	3,5													
4	Plein	0,0	28,7	17,7													
		0,5	24,0	13,0													
		1,0	21,4	10,4													
		1,5	19,3	8,3													
		2,0	17,7	6,7													
5	Open groen	0,0	27,6	16,6													
		0,5	18,8	7,8													
		1,0	15,1	4,1													
		1,5	12,8	1,8													
		2,0	11,2	0,2													
6	Wegen	0,0	27,4	16,4													
		0,5	22,9	11,9													
		1,0	20,3	9,3													
		1,5	18,3	7,3													
		2,0	16,8	5,8													
7	Bebouwing	0,0	29,8	18,8													
		0,5	25,2	14,2													
		1,0	22,5	11,5													
		1,5	20,5	9,5													
		2,0	18,8	7,8													

	Bodemfunctie is niet aanwezig
	Er worden geen effecten op de bodemfuncties verwacht.
	Er wordt een negatief effect op de bodemfuncties verwacht.
	Er wordt een positief effect op de bodemfuncties verwacht.

Tabel 14 - Effecten op bodemfuncties

5. SLOTSTUK

In dit laatste hoofdstuk wordt het onderzoek afgesloten. Hierbij wordt teruggekoppeld op de hoofdvraag en worden de belangrijkste conclusies uit het onderzoek gepresenteerd. Vervolgens worden de conclusies, waar nodig, ter discussie gesteld. Tot slot worden in de laatste paragraaf vervolgonderzoeken en andere aanbevelingen voorgesteld.

5.1. CONCLUSIE

Het probleem voorafgaand aan dit onderzoek was dat er weinig kennis was over bodemopwarming, als gevolg van klimaatverandering en hittestress, en de effecten hiervan op de bodemfuncties. Door middel van het beantwoorden van onderstaande hoofdvraag is dit probleem aangepakt.

“Welke effecten ondervinden de verschillende bodemfuncties in stedelijk gebied, door opwarming van de bodem als gevolg van klimaatverandering en hittestress?”

Dit onderzoek wijst uit dat de theorie achter bodemopwarming, klimaatverandering en hittestress zijn samen te voegen in de ‘oppervlakte energiebalans’. Door op basis van deze theorie de opwarming van de bodem door te rekenen, en daarmee de effecten voor de bodemfuncties te bepalen, is hier meer inzicht verkregen. Hiermee is voldaan aan de vooraf opgestelde doelstelling.

Het jaar 2006 representeert met een hittegolf van 16 dagen, inclusief 8 tropische dagen, het meest extreme en toch actuele weerscenario voor het huidige klimaat. In het jaar 2050 neemt het aantal tropische dagen toe tot 23 per jaar. Hierdoor is een kleine maand warmer dan 30 °C. Dit betekent een significante toename in warme dagen voor het jaar 2050. Tevens nemen de overige factoren die een positieve bijdrage leveren aan bodemopwarming allen toe in het jaar 2050.

Met de toepassing van de hittestress-module is achterhaald dat de jaargemiddelde mate van hittestress in het casusgebied tussen de +0,78 en – 1,28 °C ligt. Uit de literatuur blijkt dat dit op een dag tijdens een hittegolf op kan lopen tot ruim 8 °C. De hittestress-module geeft duidelijk weer dat hittestress sterk afhankelijk is van het oppervlakgebruik. Oppervlakken met een laag albedo en een hoge emissiviteit dragen bij aan een hogere mate van hittestress.

Door veranderingen in het klimaat en hittestress in het stedelijk gebied kan de bodemtemperatuur tot ruim 14 °C boven de standaard bodemtemperatuur van 11 °C opwarmen. Dat wil zeggen dat de bodemtemperatuur tot ruim 25 °C kan oplopen. Een duidelijk gegeven is dat de bodems waar zich verhardingen aan het oppervlak bevinden meer opwarmen dan bodems met groene oppervlakgebruiken. De warmte die aan het maaiveld wordt ontvangen, wordt met een vertraagd effect opgenomen in de bodem. Daartegenover staat dat de bodem de warmte ook weer later afgeeft. De bodem dient dus als een warmtebuffer. Niet alleen het oppervlakgebruik maar ook het bodemtype met bijhorende bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen spelen een belangrijke rol in de mate van opwarming van de bodem. Deze wordt nog eens beïnvloed door de mate van verzadigtheid van de bodem. Verzadigde bodemtypes warmen namelijk meer op dan onverzadigde.

Niet alle bodemfuncties ondervinden effecten van deze opwarming. Onderstaand zijn de bodemfuncties, die in het casusgebied effecten ondervinden van een bodemopwarming tijdens een hittegolf in 2050, opgesomd. Hierbij zijn ook de directe effecten van bodemopwarming weergegeven.

- Kabels, leidingen en riolering: Spanningskabels kunnen de warmte vanuit de kabel minder goed afgeven aan de opgewarmde bodem. Met name oude gasleidingen kunnen gaan uitzetten en krimpen, waardoor lekken of scheuren kunnen ontstaan. Doordat er meer zwavelzuur geproduceerd wordt in rioolstrengen bestaat de kans dat het riool wordt aangetast en gaat lekken.
- Levende bodem: Het leven in de bodem zal toenemen.
- Gewasproductie: Door meer leven in de bodem zal de gewasproductie toenemen.
- Voorraad grondwater: De voorraad grondwater zal door verdamping en onttrekking afnemen.
- Schone en veilige bodem: Organische vervuiling zullen eerder verdampen of omzetten waardoor deze vervuiling eerder uit de bodem verdwenen is.

De effecten die de bodemfuncties ondervinden kunnen niet los van elkaar worden gezien. Een effect op bodemfunctie x heeft ook gevolgen voor bodemfunctie y en z. Hierin veroorzaakt bodemfunctie voorraad grondwater vanuit de meeste effecten op andere bodemfuncties. Door het dalen van de grondwaterspiegel, als gevolg van bodemopwarming, ondervinden bodemfuncties draagkracht om te bouwen, gewasproductie, archeologische waarde, ecologische diversiteit, levende bodem, stabiele bodem, waterbergende bodem en koolstofbindende bodem indirect negatieve effecten.

5.2. DISCUSSIE

In de conclusie zijn de belangrijkste resultaten uit het onderzoek uitgelicht. Sommige van deze resultaten kunnen ter discussie worden gesteld. De discussiepunten van het onderzoek worden hieronder toegelicht.

De opwarming van de bodem is berekend op basis van klimaatscenario's, bodemtype met bijhorende bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen. Het gebruikte klimaatscenario van het KNMI schetst een realistisch beeld van het meest extreme toekomstig klimaat in 2050. Dit is echter een voorspelling, het is geen garantie dat het klimaat in 2050 ook zo zal zijn. De bodemtypen met bijgaande bodemeigenschappen en grondwaterstand zijn via een literatuurstudie achterhaald. Deze gegevens zijn mogelijk niet geheel representatief voor de onderzoekpunten. Tot slot zijn de lokale gebiedseigenschappen bepaald aan de hand van een vergelijking van het oppervlakgebruik met de literatuur van Stewart en Oke. Deze literatuur hanteert standaardwaarden voor de lokale gebiedseigenschappen per oppervlakgebruik. Hierdoor kan het zijn dat de lokale gebiedseigenschappen niet geheel overeenkomen met de realiteit.

Voor het doorrekenen van de bodemtemperaturen voor het jaar 2050 zijn, ten opzichte van de huidige situatie, enkel de weergegevens aangepast. De overige invoerparameters, zoals bodemeigenschappen en lokale gebiedseigenschappen, zijn gelijk gebleven. Er is echter een mogelijkheid dat deze veranderen in de toekomst.

In het onderzoek zijn niet alle bodemfuncties onderzocht op de effecten van bodemopwarming. Dit komt omdat het onderzoek zich richt op de bodemfuncties die in het casusgebied aanwezig zijn. Hierdoor kan een incompleet beeld ontstaan van de effecten van bodemopwarming op de bodemfuncties.

De effecten op de bodemfuncties zijn vastgesteld door middel van interviews met vaktechnische deskundigen. De vastgestelde effecten op de bodemfuncties berusten op de deskundigheid van de geïnterviewde maar zijn niet uit rechtstreekse wetenschappelijke literatuur afgeleid.

5.3. AANBEVELING

In deze laatste inhoudelijke paragraaf worden de aanbevelingen op het onderzoek gepresenteerd. De aanbevelingen zijn te verdelen in drie delen. Als eerste de inhoudelijke aanbevelingen, deze zijn afgeleid uit de discussie. Ten tweede de algemene aanbevelingen. Tijdens het onderzoek zijn bevindingen voor eventuele vervolgonderzoeken naar voren gekomen. Tot slot wordt het maatschappelijk belang van het onderzoek behandeld. Door een aanbeveling te geven die inspringt op de vastgestelde gevolgen voor bodemfuncties in het casusgebied wordt de maatschappelijke relevantie van het onderzoek aangetoond. Deze aanbeveling is dan ook met name geformuleerd voor het Ingenieursbureau van de Gemeente Amsterdam.

Inhoudelijke aanbevelingen

Om de meest betrouwbare invoerparameters voor het doorrekenen van de bodemtemperatuur te achterhalen moeten deze worden gemeten en onderzocht. Dit kan door middel van grondboringen, meten van peilbuizen, weergegevens en antropogene warmtebronnen en door het toepassen van een laboratoriumonderzoek naar de thermisch bodemeigenschappen.

Het vaststellen van hittestress en bodemopwarming is gedaan door het toepassen van modelberekeningen. Voor betrouwbare gegevens van de huidige situatie wordt voorgesteld om een meetnetwerk op te stellen waarin zowel factoren die hittestress veroorzaken als bodemtemperaturen op de gewenste dieptes worden gemeten.

Om de effecten van bodemopwarming per bodemfunctie te achterhalen wordt aanbevolen om een apart onderzoek te starten. Hierin wordt proefondervindelijk vastgesteld of de bodemfuncties effecten ondervinden van de bodemopwarming. De opwarming per bodemtype moet hierin centraal staan.

Een verandering in de bodemfunctie voorraad grondwater veroorzaakt effecten op vele andere bodemfuncties. Hierdoor wordt een apart onderzoek naar de invloed van bodemopwarming in combinatie met de grondwaterstand aanbevolen. In dit onderzoek moet de focus liggen op het stijgen en/of dalen van de grondwaterstand als gevolg van bodemtemperatuur.

Algemene aanbevelingen

Bij de inrichting van steden wordt steeds meer rekening gehouden met klimaatveranderingen. Er wordt aanbevolen om hierbij rekening te houden met bodemopwarming en het hitte-eilandeffect. Wellicht dat er inrichtingsmogelijkheden zijn die meerdere klimaatproblemen met één inrichtingsvorm oplossen.

Er wordt aanbevolen om een vervolgonderzoek te starten waarin inrichtingsmaatregelen tegen de effecten op de bodemfuncties duidelijk worden. Denk hierbij aan bijvoorbeeld verschillende soorten verharding of groenstructuren.

Ingenieursbureau gemeente Amsterdam

Voor een duurzaam gebruik van de bodemfuncties wordt aanbevolen om het grondwaterpeil tijdens hittegolven in de huidige situatie, maar met extra aandacht voor de toekomstige situatie, te monitoren en waar nodig te reguleren. Zoals blijkt uit het onderzoek hebben veruit de meeste bodemfuncties baat bij het gelijk blijven van de grondwaterstand. Bij een daling in de grondwaterstand zullen er negatieve effecten optreden voor vele bodemfuncties.

REFLECTIE

Beide auteurs blikken hieronder persoonlijk terug op de afstudeerperiode. Hierin wordt er gekeken naar wat er goed ging, maar ook naar wat er niet goed ging.

Roel:

Alvorens het onderzoek van start was gegaan had ik nog zo mijn bedenkingen bij een aantal stappen van het onderzoek. Zo was er nog geen casusgebied, en geen model om de bodemopwarming door te rekenen beschikbaar. Dit probleem was gelukkig al tijdens het schrijven van het plan van aanpak verholpen. Onze interne begeleider heeft ons in contact gebracht met een aantal derde partijen die tijdens ons onderzoek een steentje hebben kunnen bijdragen. Bij het afronden van het plan van aanpak was het onderzoek dan ook geheel duidelijk.

Binnen Sweco is een juiste combinatie tussen begeleiding en zelfstandig werken geboden. Hierdoor heb ik veel hebben kunnen leren over zelfstandig onderzoek doen. De samenwerking met mijn afstudeerpartner Pieter Mantel is goed verlopen. Aangezien we samen in één kantoorruimte konden werken is het overleg goed verlopen, en is het werk naar mijn inzien ook eerlijk verdeeld. Over het uiteindelijke resultaat ben ik zeer tevreden, mede omdat ik dingen te weten ben gekomen die ik vooraf nog niet wist.

Pieter:

Eind 2016, begin 2017 zijn wij erg druk geweest met het opzetten van dit onderzoek. Onderwerpen als hittestress en bodemopwarming zijn vrij actueel en waren bij ons in het voortraject relatief onbekend. Hierdoor was het lastig om een goed afgebakende onderzoeksopzet met een heldere structuur te op te zetten. We hebben de onderzoeksopzet dan ook meerdere malen herschreven. Dit heeft er wel toe geleid dat toen we eenmaal begonnen aan het onderzoek, hadden we het traject helder voor ogen.

Sweco heeft ons tijdens het onderzoek voorzien van vele contactpersonen. Door alle overleggen en vergaderingen is niet alleen mijn vaktechnische kennis enorm verbeterd, ook mijn sociale en communicatieve vaardigheden zijn enorm vooruit gegaan.

Tot slot wil ik zeggen dat ik met veel plezier aan dit onderzoek heb gewerkt. Dit komt grotendeels door de goede samenwerking met Roel. We waren af en toe behoorlijk kritisch op elkaars werk, wat soms toch wel voor irritaties zorgde, maar dit heeft wel geleid tot een hoge kwaliteit van de scriptie, en daar ben ik best trots op!

LITERATUURLIJST

- Amsterdam, G. (2017, februari 10). *Kaart van Amsterdam*. Opgehaald van Kaart van Amsterdam: <https://kaart.amsterdam.nl/#!/>
- Amsterdam, G. (sd). *Energie uit bodem en water*. Opgehaald van http://maps.amsterdam.nl/energie_bodemwater/
- Besser, R. S. (2002). *Spreadsheet solutions to two-dimensional heat transfer problems*. Louisiana.
- Blokker, M., & Pieterse-Quirijns, I. (2010). Model voor berekening van de watertemperatuur in het leidingnet. *KWR Waterycycle Research Institute*.
- Blokker, M., Moerman, A., & Agudelo-Vera, C. (2017). Drinkwatertemperatuur, bedreigingen en kansen. *TVVL Magazine [01]*, 2.
- Blom, J. (2017, april 24). Archeoloog (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- Bodemloket. (sd). *Rijkswaterstaat*. Opgeroepen op april 13, 2017, van Een initiatief van gemeenten, provincies en Rijk: <http://www.bodemloket.nl/kaart#118709,488144,120809,489992>
- Bouler, U. o. (2017, maart). *Solving a heat equation in Matlab*. Opgehaald van http://www.colorado.edu/geography/class_homepages/geog_4023_s07/labs/html/PDE_lab.html
- Brink, M. (2013). *Tegen de hitte Groen en opwarming van de stad*. Gemeente Tilburg; Gemeente Sittard-Geleen; Royal Haskoning Rotterdam. Opgehaald van Groen en opwarming van de stad.
- Consortium, C. P. (2011). *Kennismotage Hitte en Klimaat in de Stad*. TNO.
- Dauvellier. (2009). *Dauvellier planadvies*. Opgehaald van Ruimtelijke planning en ontwerp: <http://www.dauvellier.nl/uploads/images/Doorsnede2009.jpg>
- Dinoloket. (2017). *Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond*. Opgehaald van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>
- Eekeren, N. van Heeres, E., & Smeding, F. (2003). *Leven onder de graszode*. Nvlv.
- Heide, W. van der (2017, april 20). Business Development Manager, afdeling Bouw (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- Huijsmans, K. (2017, april 24). Ecoloog (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- Jasperse, M. (2017, april 18). Kabels, leidingen en riolering (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- Kennisnet, G. (2016, augustus 31). *Groen Kennisnet*. Opgeroepen op maart 24, 2017, van De bodem: <http://www.groenkennisnet.nl/nl/groenkennisnet/dossier/dossier-Bodem.htm>
- Kleerekoper, L. (2016). *Urban Climate Design*. Delft: Delft Univesity.
- Klok, E., Schaminée, S., Duyzer, J., & Steeneveld, G. (2012). *De stedelijke hitte-eilanden van Nederland in kaart gebracht met satelliedbeelden*. Utrecht: TNO innvation for life.

- Kroon, P. (2004). *De sluiting van de oppervlakte energiebalans in Cabauw gedurende TEBEX (1995-1996)*. De Bilt: KNMI.
- Lysebetten, G. V., Huybrechts, N., & Francois, L. (2013). *Bepaling thermische karakteristieken van de ondergrond*. Smart Geotherm.
- Molen, M. v., Pieterse-Quirijns, I., Donocik, A., & Smulders, E. (2009). *Eigenschappen bodem en oppervlak beïnvloeden temperatuurstijging rond drinkwaterleidingen*. Nieuwegein: KWR.
- Muntjewerff, R. (2017, april 18). Senior adviseur bodem (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- Niemans, J. L. (2011, oktober 25). *Gevangen op het hitte-eiland*. Opgehaald van Ruimtevolk: <https://ruimtevolk.nl/2011/10/25/gevangen-op-het-hitte-eiland/>
- Nijhuis, D. E. (2011). *Hittestress in Rotterdam*. Rotterdam: Gemeentewerken Rotterdam.
- Oerlemans, R. (2010). *Thermische eigenschappen van de grond voor toepassing kabeltracés*. Arnhem: Grontmij.
- Repository. (sd). *Officiële overheidspublicatie*. Opgehaald van externe bijlage: <https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2016-11362/1/bijlage/exb-2016-11362.pdf>
- Rovers, Bosch, & Albers. (2014). *Eindrapport Climate Proof Cities*. Knowledge for Climate.
- Ruimtexmilieu. (2017). *Ondergrond kwaliteiten*. Opgehaald van <http://www.ruimtexmilieu.nl/wiki/wiki/ondergrondlaag/ondergrondkwaliteiten-2>
- Ruimtexmilieu. (2017, februari 13). *Ruimte met toekomst*. Opgehaald van Inspiratie voor een duurzame leefomgeving: <http://www.ruimtexmilieu.nl/wiki/ondergrondlaag/ondergrondkwaliteiten-2>
- Rutten, M. (2017, maart). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)
- St.Barbara. (2013). *St. Barbara Amsterdam*. Opgehaald van Begraafplaats te Amsterdam: <http://www.stbarbara-amsterdam.nl/contact>
- Stewart, I., & Oke, T. (2012). *Local Climate Zones for urban temperature studies*. Vancouver, Canada: American Meteorologic Society.
- Tank, A. K., Jules, Bessembinder, J., Hurk, B. v., & Lenderink, G. (2015). *KNMI' 14*. Zwolle: Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut.
- Terlouw, T. (sd). *Greenkeeper*. Opgehaald van Bodemleven? ja en?: <http://edepot.wur.nl/141176>
- TNO innovation for life. (2017). *Geologie van Nederland*. Opgehaald van Aardwarmte: <http://www.geologievannederland.nl/ondergrond/afzettingen-en-delfstoffen/aardwarmte>
- TNO (2013). *ThermoGIS*. Opgehaald van <http://www.thermogis.nl/thermogis.html>
- TNO innovation for life. (2017). *De Nederlandse ondergrond in kaart gebracht*. Opgehaald van <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energie/geological-survey-of-the-netherlands/welkom-bij-de-geologische-dienst-nederland/de-nederlandse-ondergrond-in-kaart-gebracht-kartering/>

Tygron. (sd). WikiTygron. *Climategame*. Tygron.

Vereniging 'De Binnenvaart'. (2017, maart 21). Opgehaald van Soortelijke massa ladingen:
<http://www.debinnenvaart.nl/binnenvaarttaal/lijsten/lijsten.php?lijst=sd-ladingen>

Visser, J. de (2017, april 18). Adviseurs stedelijk water (Sweco). (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)

Wageningen UR, A. (2016). *Groen voor klimaat*. Opgehaald van
https://www.wur.nl/upload_mm/5/8/8/6464c9a7-e6db-4893-ad9c-cd0412364328_GroenvoorKlimaat.pdf

Waternet. (2017, maart). Opgehaald van <https://maps.waternet.nl/kaarten/peilbuizen.html>

Wit, J. de (2017, april). Adviseur bodemkunde en cultuurtechniek. (R. Gevers, & P. Mantel, Interviewers)

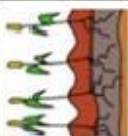
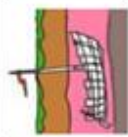
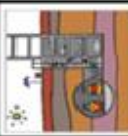
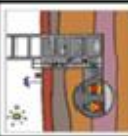
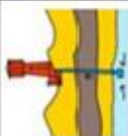
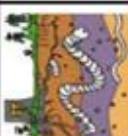
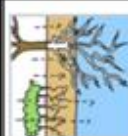
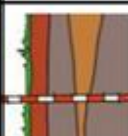
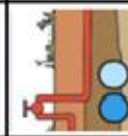
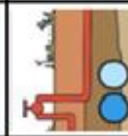
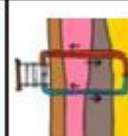
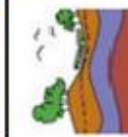
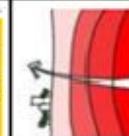
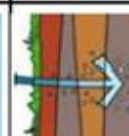
Witte, H., & Gelder, A. v. (2003). *Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaar*. Amsterdam: Groenholland BV.

BIJLAGEN

Bijlage 1: Bodemfuncties	46
Bijlage 2: Situering casusgebied	47
Bijlage 3: Deelrapport A	48
Bijlage 4: Oppervlak gebruiken	49
Bijlage 5: Hittestress Spaarndammerbuurt	50
Bijlage 6: Onderzoeklocaties	51
Bijlage 7: Achtergrond informatie	52
Bijlage 8: Overzicht KLIC	53

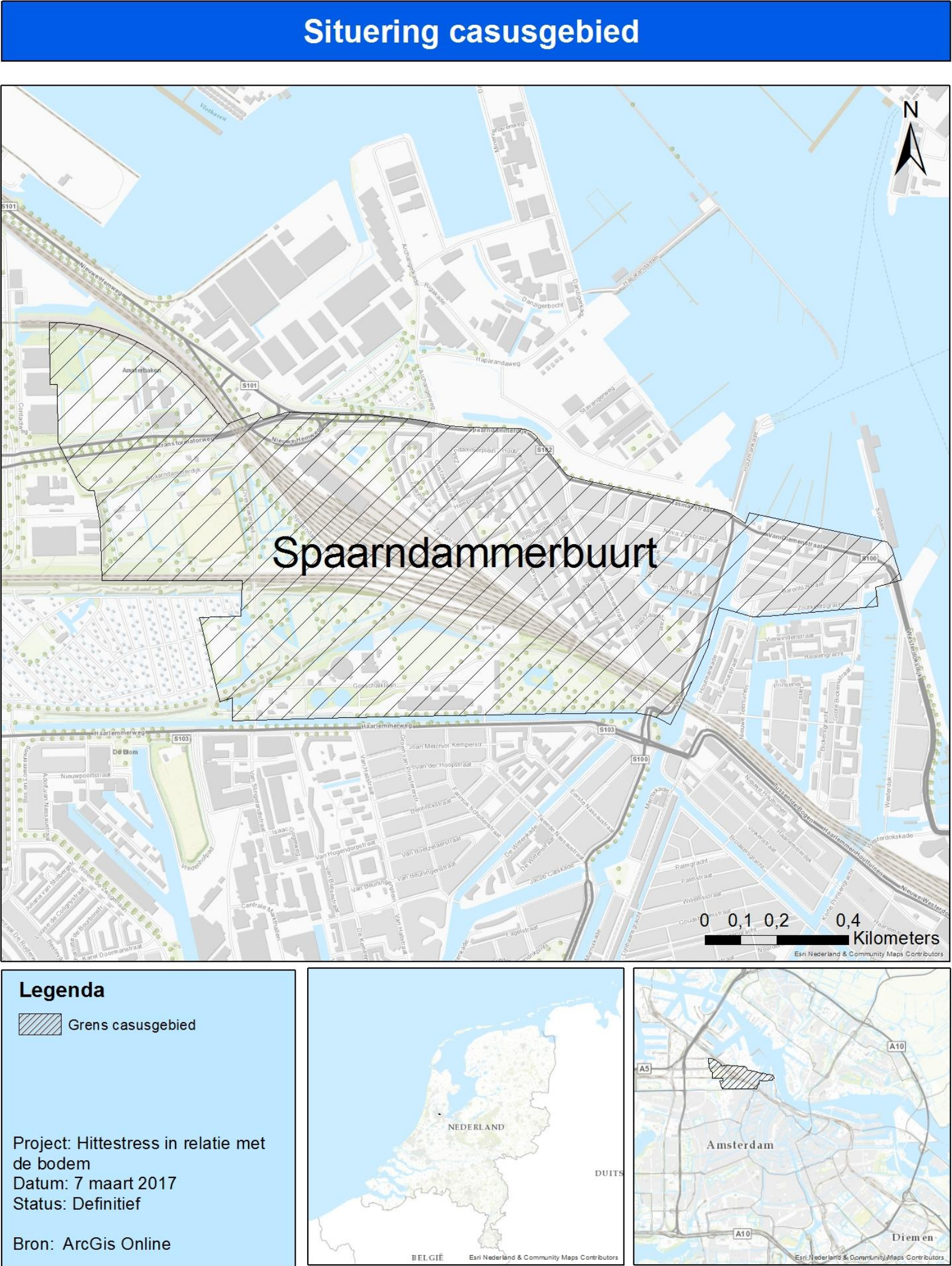
BIJLAGE 1: BODEMFUNCTIES

Een overzicht van de bodemfuncties opgedeeld in vier hoofdfuncties, volgens Ruimtexmilieu (Ruimtexmilieu, Ondergrond kwaliteiten, 2017).

Bodemfuncties									
Draag Functies		Productie Functies		Regulatie Functies		Informatie Functies			
	Draagkracht om te bouwen		Gewasproductie		Schone en veilige bodem		Archeologische waarden		
	Ondergronds bouwen		Voorraad drinkwater		Levende bodem		Aardkundige waarden		
	Kabels, leidingen en riolering		Voorraad grondwater		Stabiele bodem		Landschappelijke diversiteit		
	Buisleidingen		Warmte/koude opslag		Waterbergende bodem		Ecologische diversiteit		
			Geothermie		Waterfilterende bodem				
					Koolstof bindende bodem				

BIJLAGE 2: SITUERING CASUSGEBIED

Situering van casusgebied de Spaarndammerbuurt. Gelegen in het noordwesten van het centrum van Amsterdam.



BIJLAGE 3: DEELRAPPORT A

In dit deelrapport worden de invoerparameters benodigd voor het bodem-model achterhaald.

Onderstaand de digitale link naar Deelrapport A. Doormiddel van een 'dubbelklik' op onderstaande cover-page wordt het deelrapport geopend. Indien u de afstudeerscriptie in .pdf-formaat of hard-copy leest is onderstaand deelrapport, met bestandsnaam: Deelrapport A V3.0.pdf, los bijgevoegd.

Invoerparameters Bodem-model

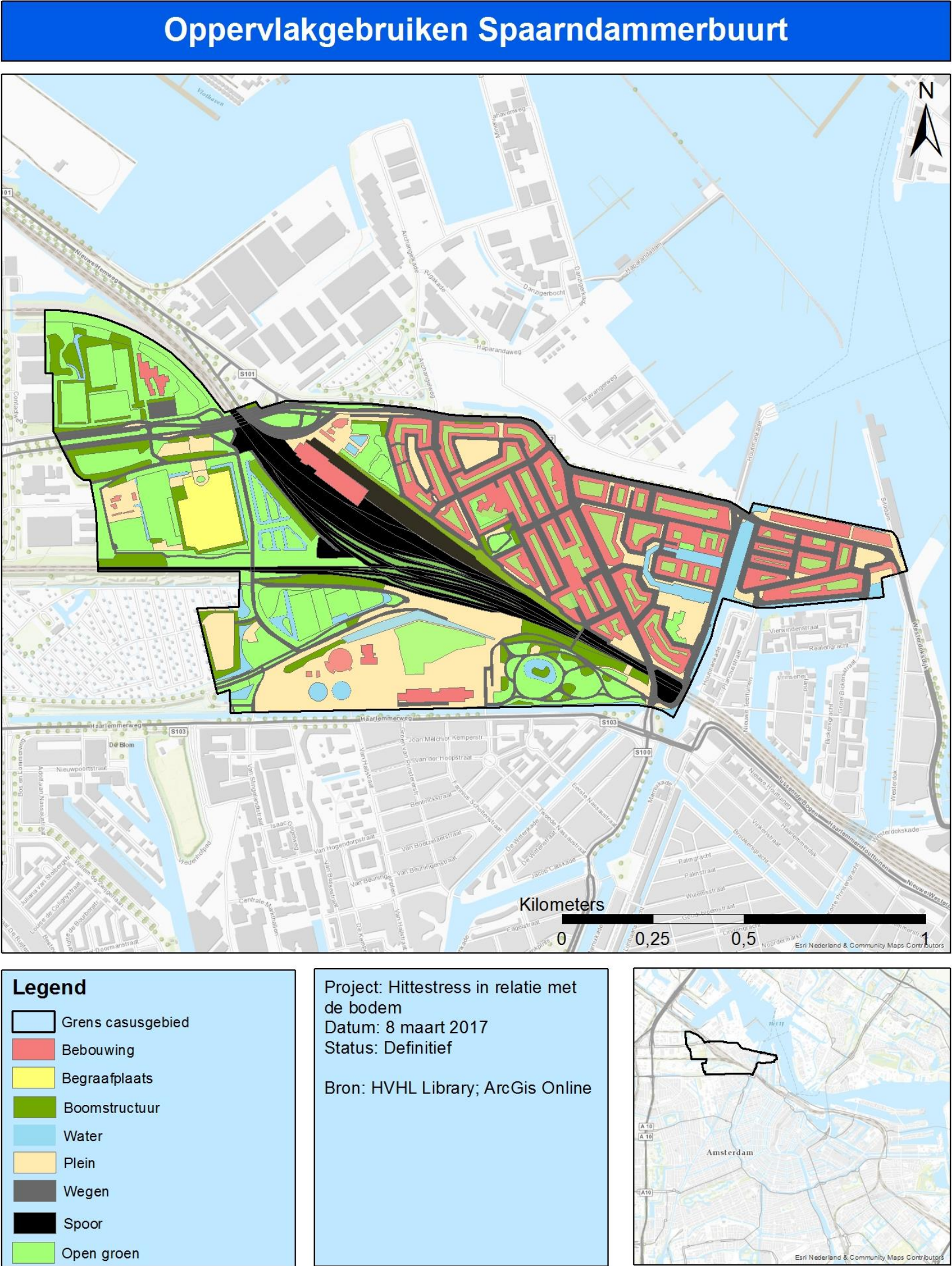
Deelrapport A, onderdeel van afstudeerscriptie 'Hittestress in de bodem'



Leeropdracht van Hogeschool Van Hall Larenstein
Auteurs: Pieter Mantel en Roel Gevers

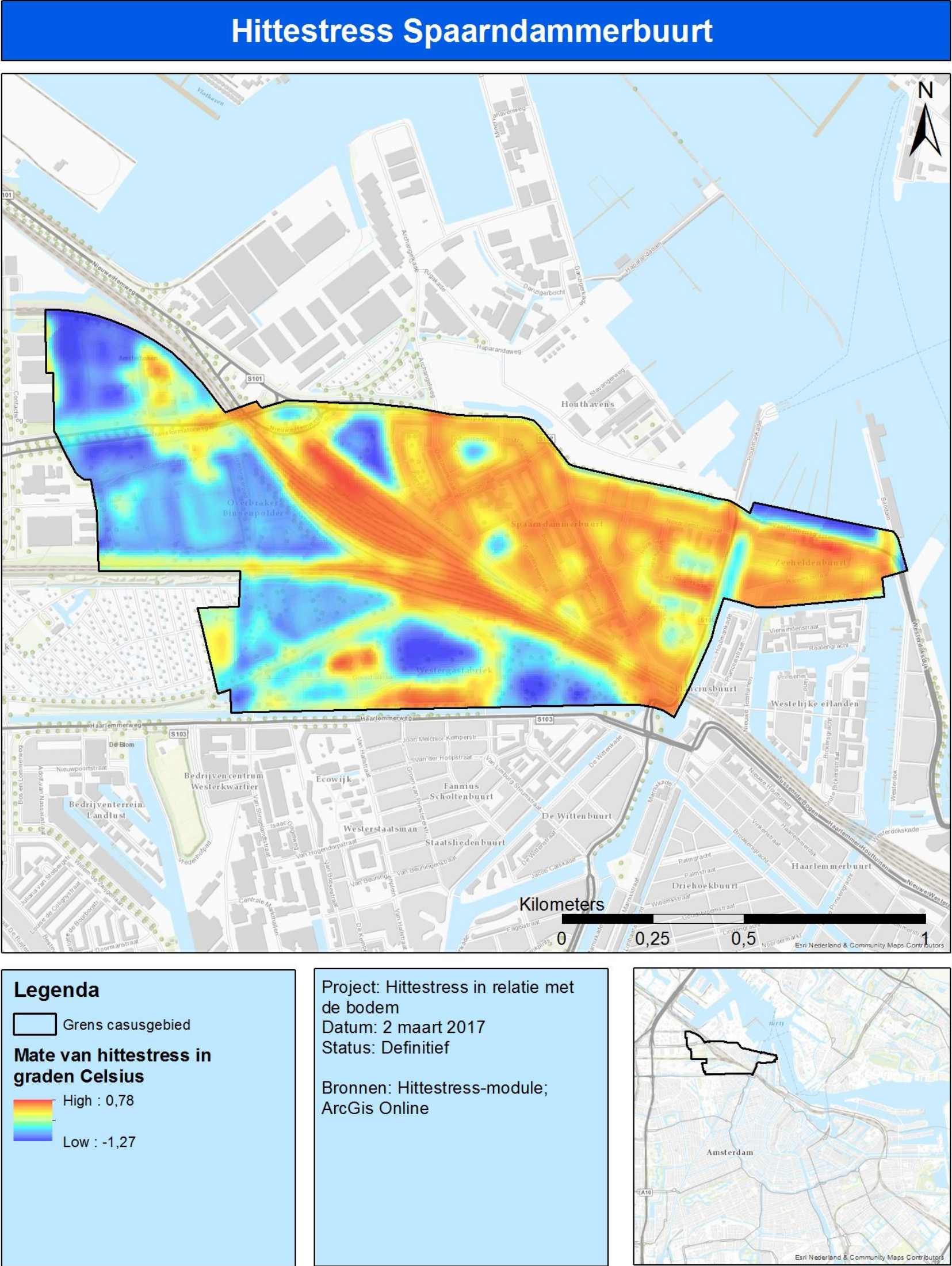
BIJLAGE 4: OPPERVLAKEGEBRUIKEN

Oppervlakgebruiken in de Spaarndammerbuurt gegenereerd uit ArcGIS.



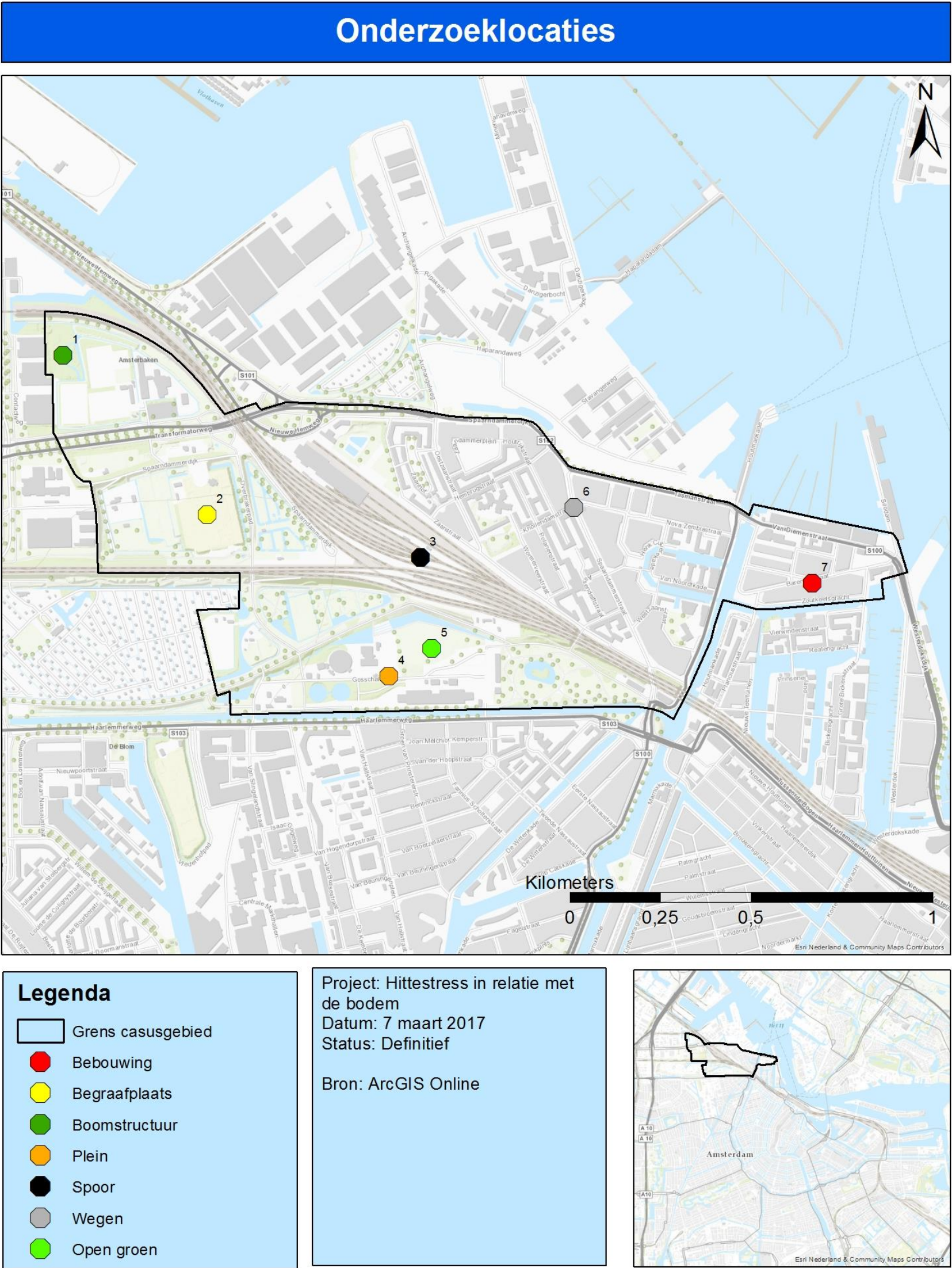
BIJLAGE 5: HITTESTRESS SPAARNDAMMERBUURT

Hittestress in de Spaarndammerbuurt gegenereerd uit de hittestress-module.



BIJLAGE 6: ONDERZOEKLOCATIES

De zeven onderzoeklocaties in het casusgebied, de Spaarndammerbuurt te Amsterdam.



BIJLAGE 7: ACHTERGROND INFORMATIE

Bijgaande USB-stick bevat alle gegevens die te groot of te uitgebreid waren om als losse bijlage toe te voegen. De inhoud van de USB-stick is gestructureerd door middel van een mappenstructuur. Onderstaand een korte toelichting per map.

- De ruwe data verkregen uit het bodem-model staan weergegeven in map *'uitkomst bodem-model'*.
- De bewerkte data voor tabellen en grafieken staan weergegeven in map *'Bewerkte gegevens bodem-model'*.
- De aantekeningen die zijn gemaakt tijdens de interviews met betrekking tot het achterhalen van de effecten op de bodemfuncties zijn opgeslagen in de map *'Interviews'*.
- In Deelrapport A wordt verwezen naar weerreeksen. Deze zijn terug te vinden onder de map *'Weerreeksen'*.

Indien u de scriptie digitaal aangeleverd heeft gekregen is de inhoud van de USB-stick meegestuurd als digitale map met naam 'Bijlage 7 Algemene informatie'.

BIJLAGE 8: OVERZICHT KLIC

Kabels en leidingen in de Spaarndammerbuurt gegenereerd uit KLIC.

