

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water

Aan: Jurian Pronk
Van: Arend de Wilde
Datum: 26 april 2021
Ons kenmerk: BG3953WATNT2101051642
Classificatie: projectgerelateerd

Onderwerp: **Effectbeoordeling van de warmteleiding op het eco-aquaduct en het NNN**

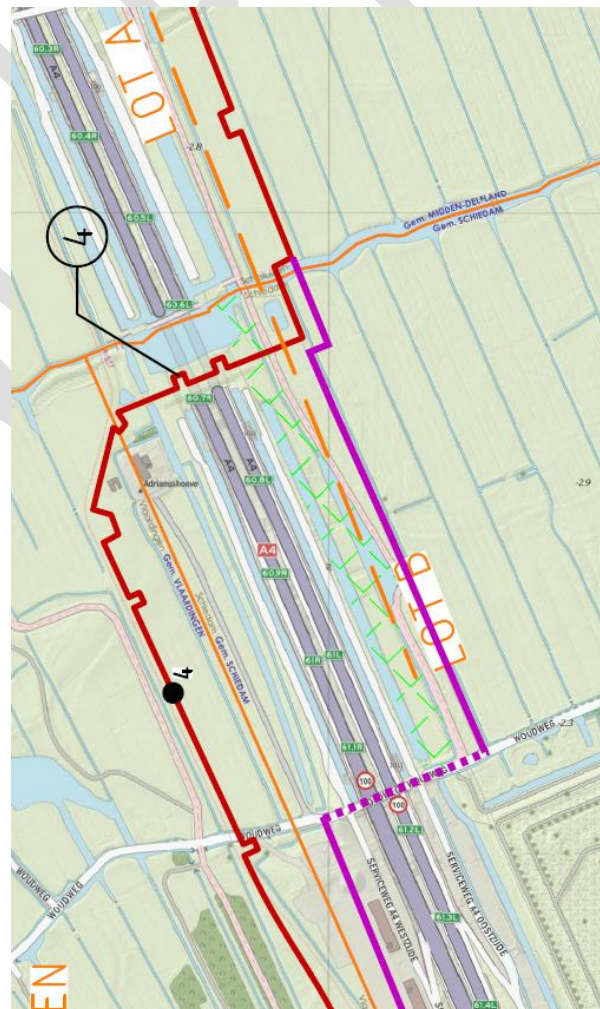
1 Aanleiding

WarmtelinQ (voorheen Eneco Warmtenetten B.V. en LdM C.V.) is voornemens om een warmte-transportleiding aan te leggen vanaf Vlaardingen (aftak van de Leiding over Noord) naar Den Haag via Delft.

Het tracé kruist het Natuurnetwerk Nederland (NNN), ter hoogte van het viaduct over de A4 en De Zweth, zie figuur 1.

De bovenkant van de transportleiding wordt in principe op een minimale diepte van 1 meter ten opzichte van het maaiveld gelegd. In de leiding wordt warm water verpompt. Hoewel de leiding goed geïsoleerd is om warmteverlies te voorkomen, zal er toch enige opwarming van de bodem rondom de leiding plaatsvinden. Verwarmen van de bodem kan effecten hebben op flora en fauna. Deze effecten zullen nader besproken worden in deze memo.

Deze versie van de memo is een update van de versie van 5 januari op basis van het definitieve rapport van Deltares over de verwachte opwarming met als referentie: 11206615-000-GEO-0002, 23 maart 2021.



Figuur 1. Ligging van het tracé (rode lijn) en de werkweg (paars) ten opzichte van het NNN (groen gearceerd).

2 Natuurwaarden NNN en het ecoduct

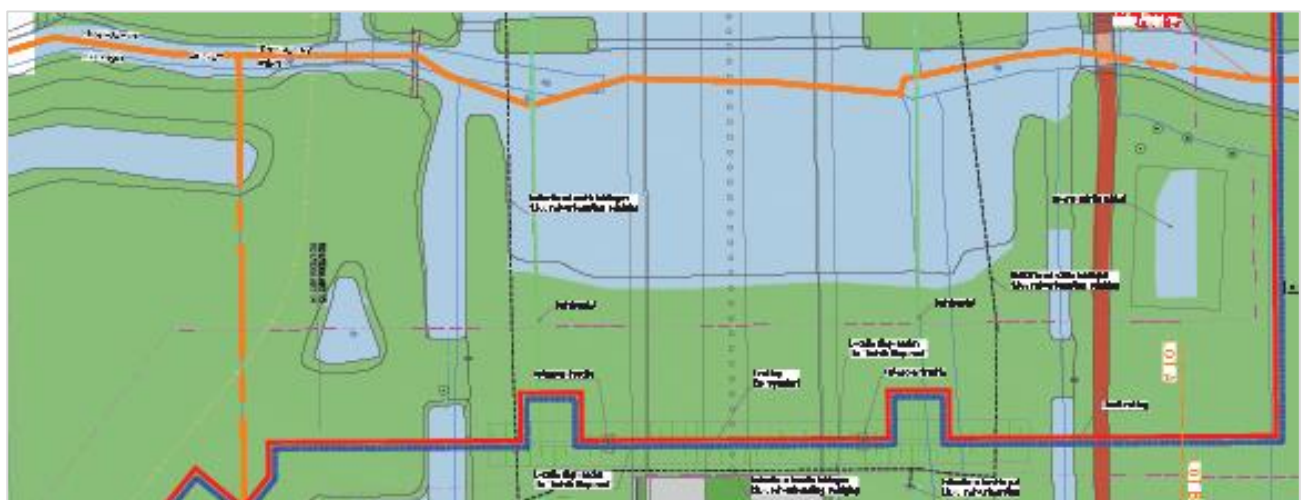
Volgens de kaart op website van de provincie van het NNN behoort alleen de smalle strook grond met sloot tussen de dijk naast de A4 en het fietspad tot het NNN (figuur 1). Daarmee zou het ecoduct (officieel: eco-aquaduct Zweth en Slinksloot) geen onderdeel zijn van het NNN. Gezien het belang van het ecoduct voor het NNN is ervan uitgegaan dat deze functioneel onderdeel uitmaakt van het NNN.

De nagestreefde natuurdoeltypen voor het ecoduct en het NNN zijn weergegeven in de Natuurbeheertypenkaart van de provincie Zuid-Holland. Volgens de Natuurbeheertypenkaart (pzh.b3p.nl/viewer/app/Natuurbeheerplan) uit 2020 wordt het deel dat is aangewezen als ecologische verbindingzone beheerd als N05.01 Moeras. Op de beheertypenkaart uit 2021 is voor het NNN deel als beheertype N05.03 N05.03 Veenmoeras. In de praktijk varieert het waterdeel op het ecoduct tussen de 50 en 60 meter en is er ook een 45 meter brede landstrook met een drogere graslandvegetatie en aan de zuidzijde een kade ook met een gras en kruidenvegetatie.

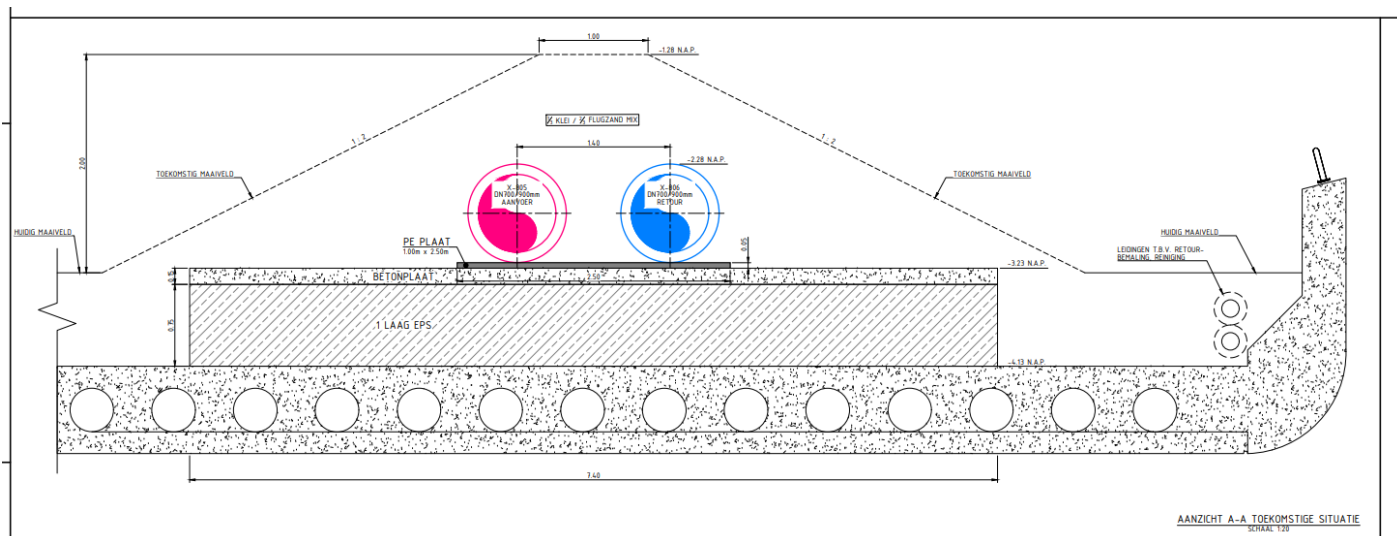
Met een breedte van 100 meter is het eco-aquaduct over de A4 het breedste van Nederland. Deze is in 2014 aangelegd en de vegetatie is hier dus pas relatief recent in ontwikkeling. Het is een combinatie met zowel land als waterhabitats. De verbinding zelf ligt op maaiveldniveau, de A4 loopt er onderdoor. Zo blijft de verbinding met het natuurgebied rondom de A4 Delft-Schiedam intact. Via het eco-aquaduct kunnen dieren zich makkelijker verspreiden. Het eco-aquaduct is onder meer bedoeld voor de noordse woelmuis, de hermelijn, de bunzing, de waterspitsmuis, verschillende vleermuissoorten, de rugstreeppad en diverse vissoorten en insectensoorten.

3 De warmteleiding

Het tracé van de warmteleiding loopt over het eco-aquaduct Zweth en Slinksloot. De kruising met de A4 vraagt om een speciale constructie omdat de snelweg er onderdoor loopt. Op het viaduct is al een klein dijklichaam aanwezig dat wordt vergraven tot op een betonplaat die op een EPS pakket ligt. Dit EPS pakket ligt op het dak van het ecoaquaduct. Op de betonplaat wordt een PE plaat geplaatst waar vervolgens de warmtetransportleiding op worden geplaatst, zie figuur 2 en 3.



Figuur 2. Boveenaanzicht van de kruising van het viaduct. Bron: Rotterdam Engineering, 2019



Figuur 1. Doorsnededetail ter hoogte van het viaduct. Bron:Rotterdam Engineering, 16-10-2020.

Het geheel wordt vervolgens weer bedekt met het afgegraven materiaal van het dijklichaam (een Flugzand-klei mengsel). Het herstellende dijklichaam wordt vervolgens ingezaaid met gebiedseigen materiaal (maaisel uit de directe omgeving) of indien mogelijk met de oorspronkelijke zoden van de kade. Direct naast het viaduct worden 4 buispalen geheid, om belasting door verzakking van de leiding op het viaduct te voorkomen.

Tijdens het functioneren van de warmteleiding stroomt er warm water door de leidingen wat warmte aan de omringende grond af zal staan. Het hele jaar door zal er warm water door de leiding stromen dus zowel in de winter als zomer zal de grond rondom de leiding warmer zijn dan de omgeving.

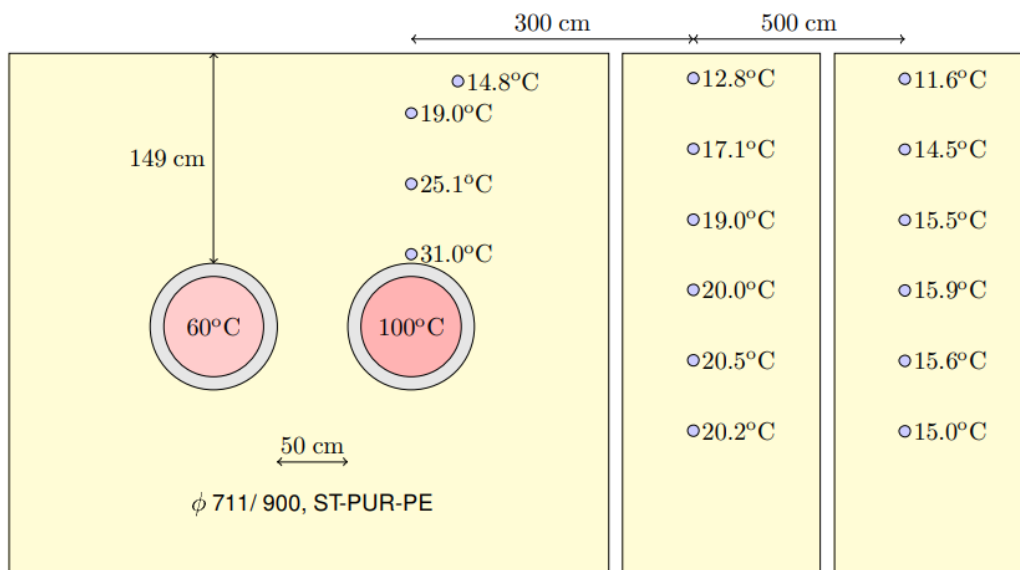
Onder natuurlijke omstandigheden wordt de bodemtemperatuur aan de oppervlakte bepaald door zonne-energie via directe instraling en luchttemperatuur. Op grote diepte speelt daarnaast ook aardwarmte, maar dat is voor de dieptes waar het voor dit project om gaat niet relevant. De directe zoninstraling en de luchttemperatuur hebben een dag- en nachtritme die op maaiveld temperatuurverschillen tot meer dan 20 graden tussen dag en nacht kan geven. Deze verschillen dempen in de bodem snel uit naar de gemiddelde temperatuur beneden de 20 cm diepte¹. Onder de 1 meter diepte dempt ook de jaarlijkse temperatuurfrequentie grotendeels uit en heerst een vrijwel constante temperatuur die overigens onder invloed van klimaatverandering wel langzaam toeneemt.

Het bovenstaande ontwerp van de warmteleiding was gebaseerd op modelberekeningen. Vanuit zowel SBB als RWS waren er vragen over de feitelijke warmteafgifte van de leiding, met name op het eco-aqueduct en onder de sloot in het naastgelegen deel van het NNN. Om een beter inzicht te krijgen in de feitelijke warmte-afgifte van een dergelijke leiding, heeft Deltares in 2020 metingen uitgevoerd langs een bestaande warmteleiding (Leiding over Noord) met vergelijkbare watertemperaturen en uitvoering. Hiervoor is met een meetlans zowel boven als naast de leiding op verschillende dieptes en afstanden gemeten wat de temperatuur is. In totaal is er op drie van dergelijke locaties gemeten (figuur 4).en zijn de uitkomsten vergelijkbaar. De resultaten van sectie 2 zijn weergegeven (figuur 5).

¹ http://projects.knmi.nl/hawa/pdf/Handboek_H11.pdf

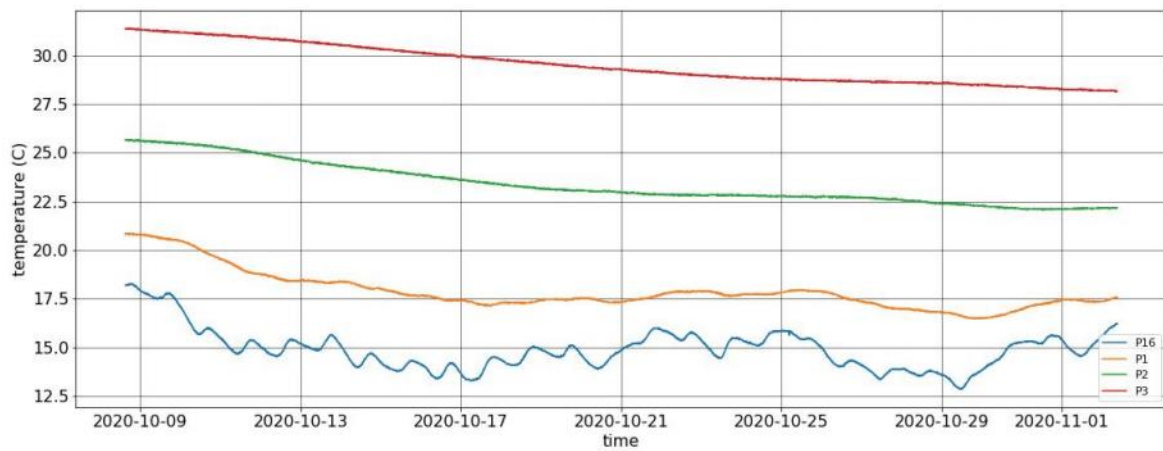


Figuur 4. Meetopstelling bodemtemperatuur (Deltares 2020).

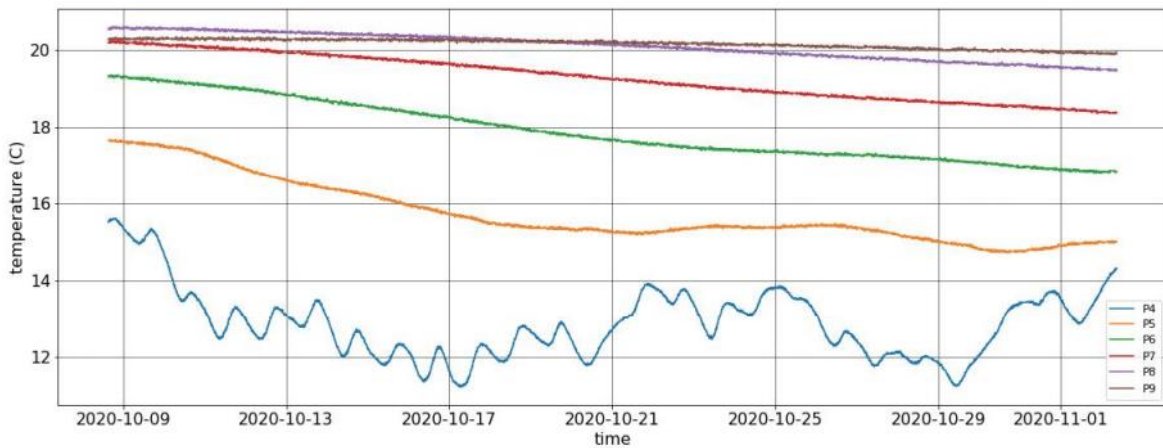


Figuur 5. Testopstelling sectie 2 boven en op 3 en 8 m naast de buizen.

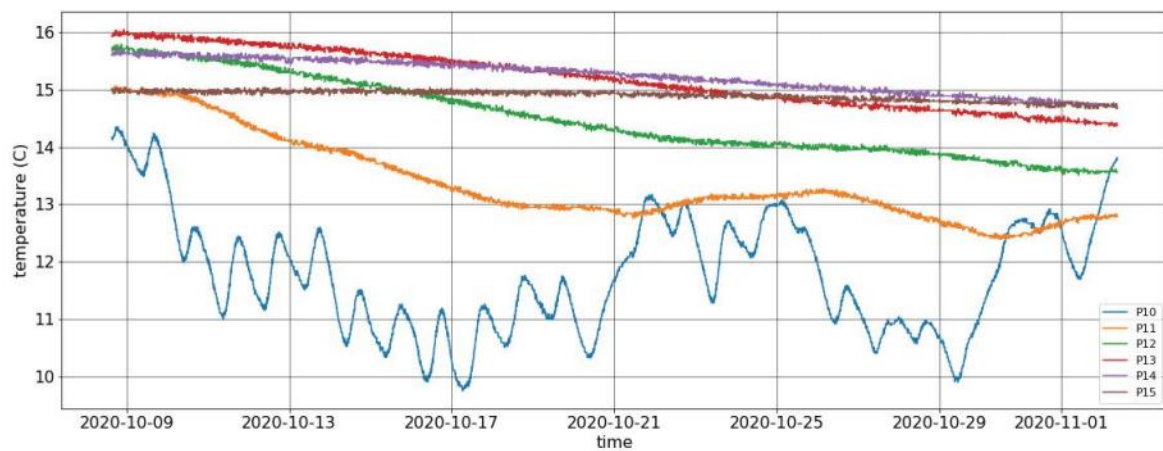
De resultaten van de metingen van sectie 2 zijn in figuur 6-8 weergegeven. Hierbij is de temperatuur van 20 cm onder maaiveld steeds met de onderste blauwe lijn weergegeven. Daar is duidelijk de effecten van de dag en nachtverschillen van de buitentemperatuur te zien.



Figuur 6. Temperatuur op verschillende dieptes direct boven de warmteleiding (Deltares)



Figuur 7. Temperatuur op verschillende dieptes op drie meter naast de warmteleiding (Deltares)

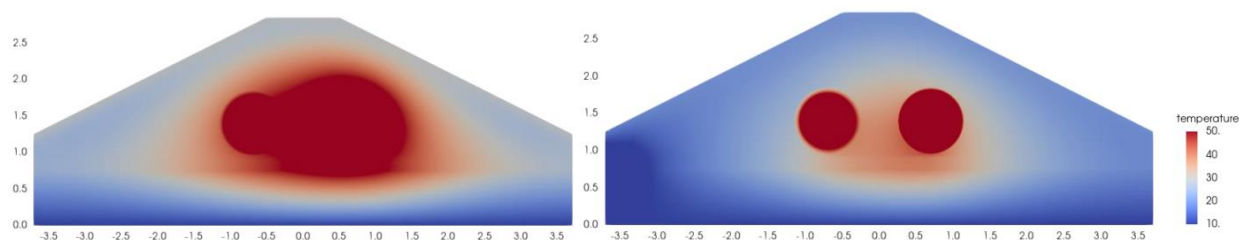


Figuur 8. Temperatuur op verschillende dieptes op 8 meter naast de warmteleiding (Deltares)

Uit deze metingen van Deltares komen een paar aandachtspunten naar voren:

- De warmte rond de buizen verspreid zich verder in horizontale richting dan naar boven. Tot op meer dan 8 meter naast de buizen zijn effecten van maximaal 2 graden gemeten. In sectie 3, met de buitenste meting op 13 meter naast de leiding zijn geen effecten meer gemeten.
- De opwarming neemt in verticale richting sneller af, en is bij de gemeten warmteleiding tussen de 2 en 4 graden op 20 cm -mv.

Met behulp van de temperatuurmetingen uit 2020 heeft Deltares hun rekenmodel gekalibreerd. Deltares heeft met dit rekenmodel in 2021 een aanvullende berekening uitgevoerd aan de warmteleiding op het ecoaquaduct en de sloot ernaast². Hierbij is gebruik gemaakt van de lokale informatie over ligging, gebruikte materialen en bodemopbouw. Van aanzienlijk belang blijkt de hoeveelheid water in de bodem. In een volledig droge bodem is de opwarming in de wortelzone aanzienlijk hoger dan in een waterverzadigde situatie. In figuur 9 is dit weergegeven.



Figuur 9. Resultaten modelberekening van de temperatuurverdeling. Links geheel droge bodem, rechts natte bodem. Referentiedatum 24 augustus 2019 (Deltares 2021)

Uit de modelberekeningen blijkt dat de opwarming in de wortelzone van het dijkje varieert van gemiddeld 6 graden in volledig droge situatie (links in figuur 9) tot 3 graden als de bodem verzadigd is van regenwater (rechts in figuur 9). Overigens zal in de praktijk de linker situatie niet optreden omdat er altijd wat bodemvocht aanwezig zal zijn.

Naar mate de afstand van de leiding toeneemt zullen deze waarden lager liggen zoals te zien is naar de zijkanten van het dijkje. Doordat de warmteleiding in een dijkje ligt op ongeveer het niveau van het omringende maaiveld, is niet aannemelijk dat deze warmte horizontaal verder zal reiken dan het talud van het dijkje.

De modelberekeningen voor de sloot in het NNN geven aan dat de bodem van de sloot direct boven de warmteleiding tot maximaal 6 graden opwarmt en ter plaatse van de slootrand 4 graden. Het volume water boven de warmte leidingen wordt ingeschat op 12 m³. Dit volume zal door een stroomsnelheid in de sloot, die wordt aangenomen op 1 m/d, in 3,5 dagen zijn ververs. Als gevolg van de thermische eigenschappen van water stijgt de temperatuur van het slootwater in die 3,5 dagen met 1°C. Het wegstromende water koelt af doordat warmte wordt afgestaan aan de lucht en de bodem verderop.

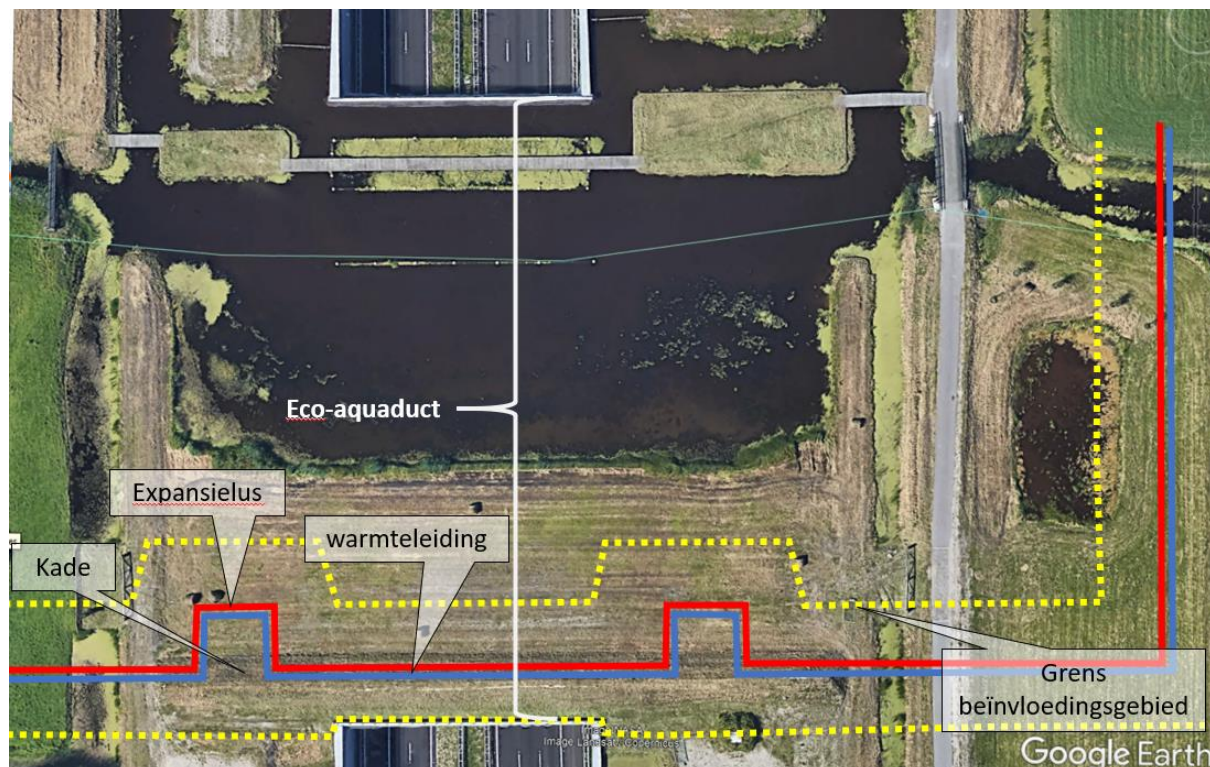
² Esch, van J. 2021. Opwarming eco-aquaduct A4 Schiedam. In opdracht van WarmtelinQ. Deltares.

4 Effect van de warmteleiding op flora en fauna

4.1 Beschrijving situatie

De ligging van de warmteleiding is aan de zuidkant van het eco-aquaduct onder de kade. Hier is de gronddekking ongeveer 1 meter. De warmteleiding heeft expansielussen die ongeveer 10 meter verder naar de noordzijde uitsteken en daarmee niet meer onder de kade liggen. De gronddekking zal ter plekke van de expansielussen ook ongeveer 1 meter zijn omdat de leiding hier dieper komt te liggen en de kade ter plekke verbreedt zal worden.

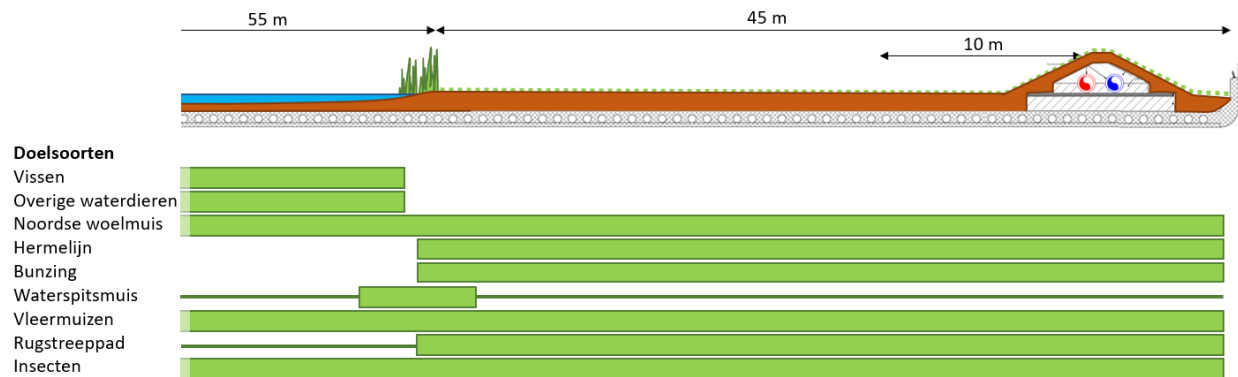
Op basis van de resultaten van de warmtemetingen, de modelberekeningen, de ligging van de leiding en de gronddekking is in figuur 9 globaal aangegeven in welk gebied naar verwachting maximaal enige opwarming van de bodem plaats kan vinden. Omdat de leiding in een dijkje ligt is de verwachting dat de horizontale opwarming echter minder zal zijn dan gemeten in een vlak gebied door Deltares in 2020.



Figuur 10. Bovenaanzicht van het eco-aquaduct (Google Earth) met daarop ingetekend de warmteleiding (rood/blauw) en een contour van ongeveer 10 meter (geel) rondom de warmteleiding als begrenzing van het beïnvloedingsgebied.

In figuur 11 is een dwarsdoorsnede van het zuidelijke deel van het eco-aquaduct gemaakt en is deze gerelateerd aan ruimtegebruik van de doelsoorten voor zover deze bekend zijn. Naast doelsoorten is een ecoduct vaak vooral van belang voor algemene soorten. Dit betreft zowel in principe allerlei diergroepen en ook plantensoorten. Het spreekt voor zich dat watergebonden organismen als vissen, waterslakken, libellenlarven etc., aan het waterdeel gebonden zijn, terwijl landorganismen zoals veel zoogdieren (haas, mol, muizen en ook de doelsoorten noordse woelmuis, hermelijn, waterspitsmuis en bunzing) en veel soorten ongewervelden over het landdeel zullen bewegen. Vliegende soorten (vleermuizen, insecten) kunnen zowel over het water als het landdeel vliegen. In de praktijk volgen vlinders echter vaak de luwte van de vegetatie of de dijk is de verwachting. Ook vleermuizen volgen vaak landschappelijke structuren zoals de oever met oevervegetatie of de kade voor hun vliegroutes. In figuur 11 is globaal aangegeven

welk deel van de ecoverbinding voor welke soort geschikt is. Snelle soorten (haas, hermelijn, vleermuizen, vogels etc.) passeren de het eco-aquaduct in seconden of minuten en kiezen daarvoor het moment in het jaar en dag dat voor hen geschikt is. Andere soorten kunnen veel langer op het eco-aquaduct verblijven of daar zelfs een groot deel van hun leven doorbrengen. Voor deze laatsten is het van belang dat zij het hele jaar door geschikte leefomstandigheden op het eco-aquaduct zullen vinden. Dit betreft in ieder geval planten en ook weinig mobiele soorten als slakken, mieren, etc.



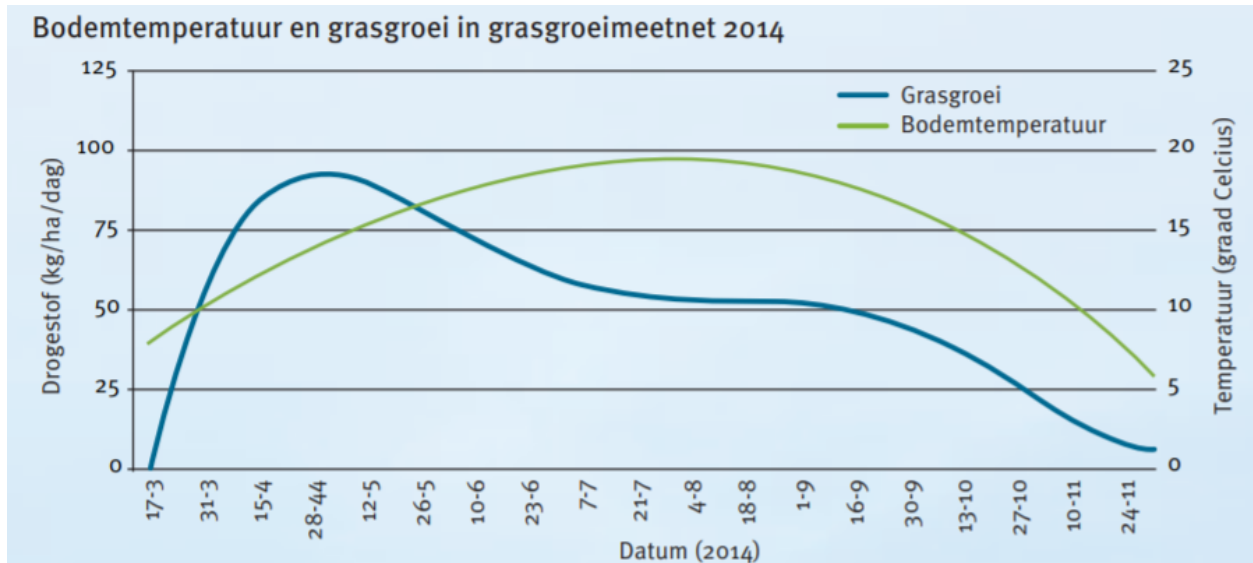
Figuur 11. Dwarsdoorsnede van het eco-aquaduct met daarop ingetekend de warmteleiding (rood/blauw) en globaal de zones die door de verschillende doelsoorten(groepen) gebruikt kunnen worden (RHDHV).

Direct ten oosten van het eco-aquaduct kruist de warmteleiding een stukje NNN met daarin een slotje van ongeveer 4 m breed net ten zuiden van de duiker (zie figuur 10).

4.2 Overwegingen

Op het eco-aquaduct is onbekend of de warmte van de warmteleiding tot meer dan 8 meter meetbaar zal zijn zoals bij de Leiding om noord waar de proefmetingen zijn uitgevoerd. Op het eco-aquaduct is immers maar een dunne bodemlaag die zowel naar de lucht als naar het betondek eronder ook warmte af kan geven. In deze rapportage is op basis van de beschikbare informatie ervan uitgegaan dat er maximaal tot 10 meter vanaf de leiding nog enig warmte-effect meetbaar zal zijn. De verwachting is echter dat dit gezien de beperkte grond dikte en door de ligging in het dijkje duidelijk minder zal zijn. Uit de metingen in het veld voor de Leiding om Noord is wel duidelijk dat bij een gronddekking van ongeveer 1 meter, een opwarming van 2-5 graden boven de referentiewaarden te verwachten is op een diepte van 20cm - mv direct boven de warmteleiding. De modelberekeningen van Deltares (2021) gaan uit van een range van 3 – 6 graden, waarbij 6 graden alleen bij extreem droge omstandigheden te verwachten is. De verwachting is daarom dat ook voor WarmtelinQ op het eco-aquaduct direct boven de warmteleiding de temperatuur 3-5 graden hoger zal zijn dan de omgeving, en dat op afnemende afstand deze opwarming afneemt en maximaal tot op 10 meter afstand van de warmteleiding meetbaar zal zijn.

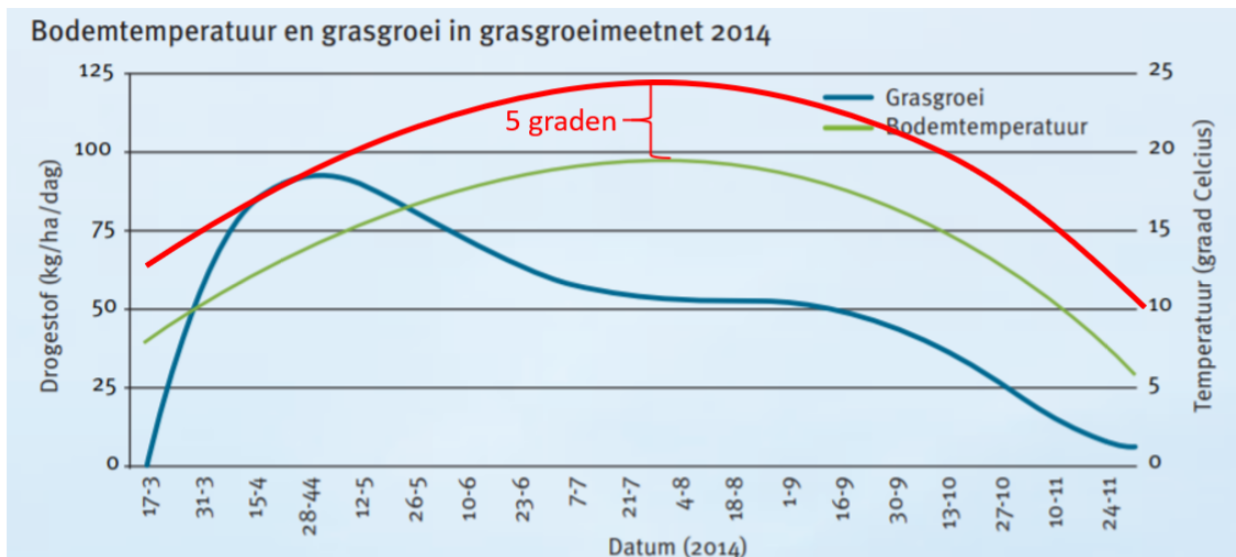
De lokale bodemtemperatuur is afhankelijk van verschillende factoren zoals de directe zoninstraling, beschaduwing (door bv hoog opgaand gras), luchttemperatuur, wind, bodemtype en hellingshoek. In figuur 12 is het gemiddelde bodemtemperatuurverloop onder grasland in combinatie met de ontwikkeling van de grasvegetatie door het jaar weergegeven.



Figuur 12. Relatie bodemtemperatuur en grasgroei. (Bron Wageningen UR. <https://edepot.wur.nl/338038>)

Bij een bodemtemperatuur van ongeveer 8 graden begint gras te groeien. Boven de 20 graden stoppen de in Nederland voorkomende grassen geleidelijk met groeien om bij een bodemtemperatuur van rond de 25 graden geheel te stoppen. De groei is optimaal tussen een bodemtemperatuur van 12°C en 20°C.

Een opwarming van 0-5 graden van de bodem van een deel van het eco-aquaduct zorgt ervoor dat in dat deel zowel de minimumtemperatuur als de maximumtemperatuur hoger komt te liggen. In figuur 13 is dit schematisch aangegeven in dezelfde figuur als figuur 12 hoe de bodemtemperatuur dan globaal zou verschuiven bij een maximale toename van 5 graden. Hiervan zal alleen sprake zijn direct boven de warmteleiding, op de taluds en direct naast het dijkje is het dus minder.



Figuur 13. Als figuur 12 met daarin toegevoegd de bodemtemperatuur met 5 graden verhoging

Uit figuur 13 valt op dat bij een maximale verhoging van 5 graden de minimumtemperatuur hooguit 1-2 maanden onder de 8 graden zal vallen. De maximale temperatuur zal ook in de zomer vrijwel altijd nog onder de 25 graden blijven en een groot deel van het jaar zal de bodemtemperatuur boven de 20 graden

liggen. Als gevolg hiervan zal in het winterhalfjaar, globaal van half oktober tot half mei, op de warmste plek dicht boven de leiding het gras het grootste deel van de tijd goed kunnen groeien, terwijl in het zomerhalfjaar vooral kruiden die van droogte en warmte houden zich daar zullen ontwikkelen. Naar mate de afstand tot de warmteleiding afneemt, zal dit effect ook afnemen.

De meeste kruiden en grassen die in grasland en dus ook op het eco-aquaduct en de het NNN groeien, wortelen tot 20-30 cm diepte. Het slootje waar de warmteleiding onderdoor loopt, heeft de waterbodem op ongeveer 40-50 cm beneden maaiveld. Langs de oever van het slootje groeien moerasplanten die vooral oppervlakkig wortelen. De planten direct boven de warmteleiding zullen in hun wortelzone dus een substraat aantreffen dat 2-5 graden warmer is dan gemiddeld. Deze hogere warmte zal, naast de hogere warmte zelf, ook leiden tot snellere uitdroging. Deze groeiplek zal daarom in het zomerhalfjaar vooral geschikt zijn voor soorten die diep wortelen, en dus minder last hebben van uitdroging, voor droogtetolerante soorten, en soorten met een korte groeicyclus die na een regenbui de hele groeicyclus snel doorlopen. In de winterperiode is het neerslagoverschot voldoende om droogtestress bij de meeste soorten te voorkomen³ en zal droogte nauwelijks invloed hebben op de soortensamenstelling.

De jaargemiddelde temperatuur in Nederland is sinds 1906 met 1,9 C toegenomen. De lente en de zomer zijn het sterkst opgewarmd. De belangrijkste reden voor de trendmatige toename van de gemiddelde temperatuur op aarde in de laatste 50 jaar is het door de mens veroorzaakte versterkte broeikaseffect⁴. De huidige Nederlandse natuur heeft dus te maken met een temperatuurregime die al aanzienlijk warmer is dan ruim een eeuw geleden. Hieraan zijn allerlei gevolgen gerelateerd zoals:

- Verdroging. Dit wordt deels ook veroorzaakt door toegenomen onttrekkingen en drainages
- Verschuiving groeiseizoen. De plantengroei – en bloei komt eerder op gang na de winter en loopt langer door.
- Verdwijnen van droogte- en warmte-intolerante soorten.
- Toename en introductie van droogte- en warmte-minnende soorten

De verwachting is dat deze processen de komende jaren zeker door zullen gaan. Als gevolg hiervan vindt er een verschuiving plaats in zowel de flora als de fauna waarbij de verwachting is dat de soortensamenstelling in Nederland uiteindelijk gaat lijken op de huidige situatie in midden Frankrijk.

Dijken en kades vormen een kunstmatig habitat in het Nederlandse landschap en met name op dijken in het rivierengebied hebben zich in de loop van de eeuwen soorten afkomstig uit Midden-Europa gevestigd. Aan de ene kant omdat zichzelf of hun zaden via het rivierwater of de oevers konden migreren, en anderzijds omdat de dijken en natuurlijke afzettingen van kalkrijk zand voor geschikte habitats zorgden. Dit betreft bijvoorbeeld de vele soorten van stroomdal- en glanshaverhooilanden. Veel van deze soorten uit het heuvel- en bergland van de bovenloop van de Rijn hebben behoefte aan kalkrijke en goed gedraineerde bodems en groeien daarom beter in zanderige en droge bodems. De abiotiek in de vorm van bodemmateriaal, helling en expositie van de dijk bepaalt voor een belangrijk deel welke vegetatie er - duurzaam - mogelijk is op een dijk. Voor het ontwikkelen van een biodiverse vegetatie en bijbehorende fauna op dijken wordt gestreefd naar een bodem die kalkrijk is en snel opdroogt. Dat botst vaak met de rol die de vegetatie op de dijk heeft ten aanzien van de waterveiligheidsfunctie waar het bijdraagt erosie te voorkomen. Deze erosiebestendigheid wordt bepaald door de samenstelling van de toplaag van de dijk in combinatie met de dijkvegetatie. De dijkvegetatie zorgt ervoor dat de erosiekrachten van het langsstromend water niet rechtstreeks de bodem raken. Daarom is een dichte vegetatie en een goede doorworteling van belang voor dijken met een waterkerende functie.

³ Luske, B. et al. 2012. Beworteling van grasland en droogtetolerantie. Louis Bolk Instituut. Publicatienummer 2012-028 LbD

⁴ <https://www.clo.nl/indicatoren/nl022613-temperatuur-mondiaal-en-in-nederland>

De kade op het eco-aquaduct heeft geen enkele waterveiligheidsfunctie en er is daarom geen enkele noodzaak om een dichte en gesloten grasmat in stand te houden. De kade heeft vooral een windkerende om te zorgen voor luwte voor vliegende dieren en daarnaast een geleidende functie voor bijvoorbeeld vleermuizen. Het is daarvoor helemaal niet relevant of de vegetatie wel of niet goed ontwikkeld is. Daar komt bij dat de kade klein is en daardoor de taluds kort. De hoeveelheid afstromend regenwater zijn daardoor beperkt en er is geen sprake van grote volumes of hoge stroomsnelheden die voor erosie kunnen zorgen.

De vegetatie op de kade is leef- en foerageergebied voor allerlei soorten. Daarvoor is vooral de biodiversiteit een belangrijk criterium. Meer soorten planten (en daarmee samenhangende diersoorten) betekent immers meer kansen voor andere soorten om, schuilplaatsen, voedselplanten, nectar of prooien te vinden. De kade zorgt doordat deze droger is dan de rest van het landdeel van de eco-aquaduct en betekent daarmee een verrijking van het aanbod van habitats. De zuidkant van de kade warmt bovendien meer op dan de rest van de graslanden, en biedt daarom al vroeger in het voorjaar tot later in het najaar een plek waar planten kunnen groeien en bloeien en waar koudbloedige dieren zich kunnen opwarmen.

4.3 Effecten van de warmteleiding op het eco-aquaduct

Tijdens de aanleg van de warmteleiding wordt het bestaande talud op het eco-aquaduct geheel vergraven. Hierdoor zal de kade tijdelijk niet gebruikt kunnen worden als leefgebied of verbindingszone. Doordat het overgrote deel van het eco-aquaduct onaangetast blijft, kunnen daar alle functies wel behouden blijven. Wel dient tijdens de aanleg negatieve effecten op bijvoorbeeld broedvogels voorkomen te worden door het implementeren van de maatregelen uit het ecologisch werkprotocol.

Uit de beschrijving van de effecten van de warmteleiding en de overwegingen in de vorige paragraaf blijkt duidelijk dat de effecten maximaal tot op 10 meter van de leiding op zullen treden. Daar volgt direct uit dat er over een breedte van ongeveer 80 meter van het eco-aquaduct in het geheel geen effecten op zullen treden. Het gehele waterdeel inclusief de oevervegetaties zullen dus zeker geen effecten ondervinden.

De kade, en vooral de strook boven de leiding zal vrijwel zeker te maken krijgen met een opwarming in de orde grootte van 2-5 graden gedurende het hele jaar in de wortelzone van de vegetatie. Dit zal invloed hebben op standplaatsfactoren als droogte en temperatuur. Hierdoor zal in het winterhalfjaar vooral het groeiseizoen van alle daarop voorkomende vegetatie verlengd worden en in het zomerhalfjaar zal het vooral droogte- en warmteminnende planten bevoordelen. Er is geen enkele reden aan te nemen dat er zich geen vegetatie op de kade zal ontwikkelen. De maximaal te verwachten bodemtemperatuur van orde grootte 24 graden is geen enkele belemmering voor zowel grassen als kruiden van droge, warme en zonnige standplaatsen. De kade zal daarom jaarrond begroeid zijn en daarmee zowel een functie voor planten en dieren vervullen als het dijklichaam zelf beschermen tegen erosie.

Als gevolg van de al jarenlang optredende klimaatverandering vindt al een geleidelijke toename plaats van warmteminnende soorten en zal deze ontwikkeling zich nog lang voortzetten. De kade zal daardoor een geschikte plaats zijn om zich te vestigen voor dergelijke soorten die nu vooral nog in droog en warme stedelijk gebied te vinden zijn zoals aarereprijs, Balkanvergeet-mij-nietje en de Zuid-Afrikaanse gierst. De vegetatiediversiteit zal daardoor lokaal een klein beetje kunnen veranderen en ook de geassocieerde fauna zal iets kunnen veranderen.

De functie van het eco-aquaduct betreft vooral leefgebied en verbindingszone voor verschillende planten en vooral diersoorten. In figuur 1.1 zijn de voornaamste doelsoorten en soortengroepen genoemd. In tabel 1 is aangegeven in hoeverre de effecten van de warmteleiding invloed hebben op deze functie.

Tabel 1. Effecten van de warmteleiding op doelsoorten voor het eco-aquaduct

Doelsoort/groep	Mogelijke effecten warmteleiding	Opmerkingen
Vissen	Uitgesloten	De waterhabitats ondervinden geen enkel effect
Overige waterdieren	Uitgesloten	De waterhabitats ondervinden geen enkel effect
Noordse woelmuis	Uitgesloten	Het eco-aquaduct is niet geschikt als leefgebied maar wel als verbindingszone. De waterhabitats en een groot deel van de landhabitats ondervinden geen enkel effect. Het drogere deel van het talud is thans al nauwelijks geschikt als verbindingszone. Door een wat drogere vegetatie en een iets andere soortsaamenstelling verandert deze functionaliteit niet.
Hermelijn	Uitgesloten	Het landgedeelte van het eco-aquaduct is geschikt als onderdeel van het landleefgebied en als verbindingszone. De hermelijn komt ook in veel warmere klimaten voor dan Nederland en kan het talud ook met een drogere en iets andere vegetatie prima als leefgebied gebruiken.
Bunzing	Uitgesloten	Zowel het water- als het landgedeelte van het eco-aquaduct is geschikt als onderdeel van het leefgebied en als verbindingszone. De bunzing komt ook in veel warmere klimaten voor dan Nederland en kan het talud ook met een drogere en iets andere vegetatie prima als leefgebied gebruiken.
Waterspitsmuis	Uitgesloten	De waterspitsmuis leeft vooral langs de ondiepe oeverzone van schoon water. Het eco-aquaduct is daarmee in potentie zowel geschikt als leefgebied en als migratiezone. De oeverzone ondervindt geen enkel effect van de warmteleiding. De soort maakt ook wel gebruik van grasland om te foerageren. Omdat de soort ook in warmere delen van Europa voorkomt zal de warmteleiding geen effect hebben op de kwaliteit van het leefgebied.
Vleermuizen	Uitgesloten	Deze soorten vliegen over het eco-aquaduct om daar te foerageren of als vliegroute. Een marginale verandering in de vegetatie op de kade heeft geen enkel effect.
Rugstreeppad	Uitgesloten	Ook deze soort komt ook in veel warmere gebieden voor en zal geen enkel negatief effect ondervinden van de warmteleiding
Insecten	Uitgesloten	Het toevoegen van een iets droger en warmer habitat is juist een verrijking en kan de vestiging van warmte- en droogteminnende soorten op de kade juist stimuleren.

4.4 Effecten van de warmteleiding op het NNN

De warmteleiding kruist een strook grasland met daarin een slootje welke onderdeel zijn van het NNN. De leiding zal hier ruim 1 meter gronddekking hebben waardoor de effecten op het grasland minder zijn dan op het grasland van het eco-aquaduct. Het is mogelijk dat er lokaal wat meer droogte en warmtetolerante plantensoorten voor zullen gaan komen.

De warmteleiding kruist een slootje waarbij de gronddekking ongeveer 100 cm is. Dit zal leiden tot het lokaal opwarmen van de slootbodem met maximaal 6 graden. Als gevolg van een aangenomen stroming van 1 m/d zal het slootwater met ongeveer 1 graad opwarmen. In het winterhalfjaar zal dit ervoor zorgen dat lokaal de temperatuurcondities net iets anders zijn dan in de omgeving. Insecten, slakken en andere ongewervelden zullen mogelijk iets langer actief blijven en vissen en watervogels zullen deze plek opzoeken om op te warmen. Tijdens het winterhalfjaar zijn de watercondities geschikt voor alle in de omgeving voorkomende waterorganismen en kunnen bijvoorbeeld vissen de sloot net als in de huidige condities gebruiken als migratieroute.

In het zomerhalfjaar zal de watertemperatuur ook ongeveer 1 graad hoger liggen dan de huidige waarden en bij weinig stroming als gevolg van weinig neerslag kan deze temperatuur mogelijk nog enkele graden extra stijgen. Hierdoor kunnen de lokale condities voor planten en dieren minder geschikt of zelfs tijdelijk ongeschikt worden doordat bijvoorbeeld de zuurstofgehalten te veel dalen en/of er algenbloei kan ontstaan. Het is te verwachten dat na een regenbui het water in de sloot doorspoelt en de oorspronkelijke condities zich weer even herstellen. Omdat de opwarming doorgaat is de verwachting dat met name tijdens perioden met hoge luchttemperaturen de sloothabitat over een lengte van ordegrootte 5 – 10 meter verminderd tot ongeschikt zal zijn voor waterleven.

Tijdens de aanleg van de warmteleiding door het NNN zijn effecten op planten en dieren mogelijk. Door het toepassen van de mitigerende maatregelen uit het ecologisch werkprotocol worden deze zoveel als mogelijk beperkt.

5 Conclusies

- De aanleg van de warmteleiding op het eco-aquaduct heeft zeker tot gevolg dat de bodemtemperatuur lokaal tot mogelijk 5 graden toe kan nemen.
- Dit zal effecten hebben op de plantensoorten die daar kunnen groeien en ook op enkele diersoorten die daar voorkomen.
- Het gevolg hiervan is dat zich vooral plantensoorten kunnen vestigen die warmte- en droogte minnend zijn. Deze plantensoorten dragen bij aan het functioneren van het eco-aquaduct als leefgebied en verbindingzone en hebben op geen enkele wijze een negatief effect op het functioneren hiervan.
- Erosie van de kade is niet aan de orde omdat er altijd vegetatie zal groeien.
- Dit aanvullend droger en warmer habitat zal ook een geschikte vestigings- of verblijfplaats zijn van diersoorten voor dit soort habitats en draagt hiermee bij aan de biodiversiteit van de locatie.
- De warmteleiding door het NNN zorgt voor vergelijkbare effecten op het landdeel hiervan als op het eco-aquaduct.
- De waterhabitat in de sloot van het NNN zal met name in het zomerhalfjaar licht negatief beïnvloed kunnen worden doordat de gemiddelde temperatuur ongeveer 1 graad zal stijgen.
- De functie van deze sloot als verbindingzone voor vissen zal in het winterhalfjaar en tijdens/na regenbuien blijft behouden.
- De aanleg van de warmteleiding op het eco-aquaduct geeft geen blijvende negatieve effecten.
- Tijdens de aanleg kunnen negatieve effecten optreden. Door toepassen van mitigerende maatregelen uit kunnen deze voorkomen of beperkt worden.

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water

Aan: Gasunie
Van: Arend de Wilde
Datum: 18 augustus 2021
Ons kenmerk: BG3953WATNT2101051642
Classificatie: projectgerelateerd

Onderwerp: **Effectbeoordeling van de warmteleiding op bomen in Den Haag**

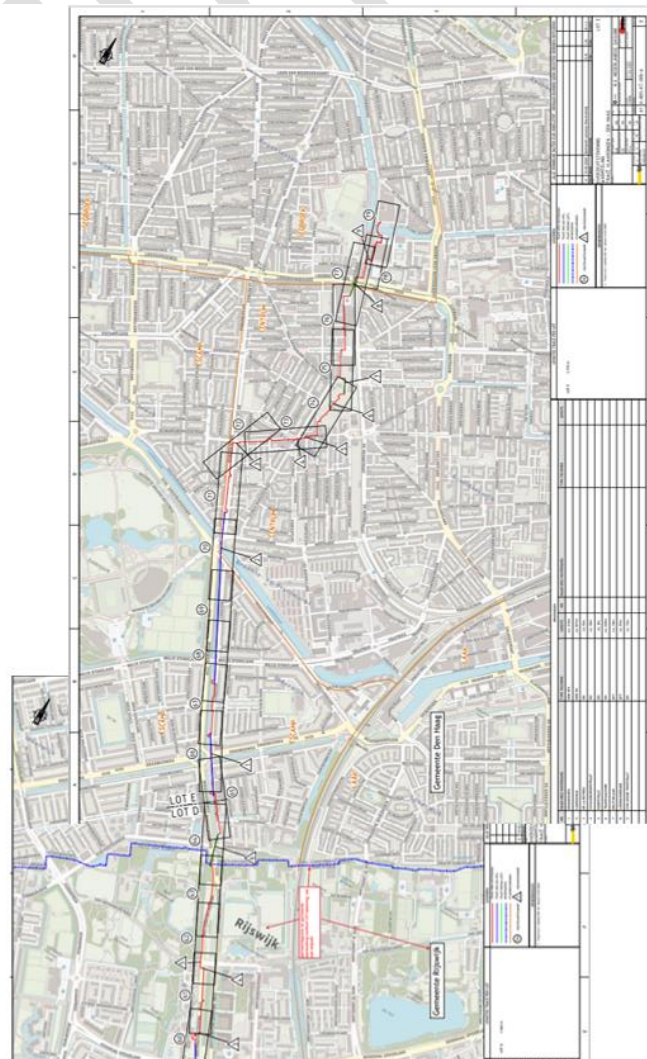
1 Aanleiding

WarmtelinQ is voornemens om een warmte-transportleiding aan te leggen vanaf Vlaardingen (aftak van de Leiding over Noord) naar Den Haag via Delft.

Het tracé loopt voor een deel door Den Haag, zie figuur 1.

De bovenkant van de transportleiding ligt afhankelijk van de locatie tussen de 1 en 1,5 m onder het maaiveld. In de leiding wordt warm water verpompt. Hoewel de leiding goed geïsoleerd is om warmteverlies te voorkomen, zal er toch enige opwarming van de bodem rondom de leiding plaatsvinden. Verwarmen van de bodem kan effecten hebben op wortels van bomen en andere planten. De gemeente Den Haag wil nader inzicht hebben in met name mogelijke effecten op bomen. Deze mogelijke effecten zullen besproken worden in deze memo. Deze memo is gebaseerd op onderzoek van Deltares¹ en de WUR². Deze laatste is als bijlage bij deze memo gevoegd.

Figuur 1-1. Globale ligging van het tracé in Den Haag.



¹ Esch, van J.M. 2021. Warmteoverdracht stedelijke omgeving warmteleiding Vlaardingen - Den Haag. Deltares

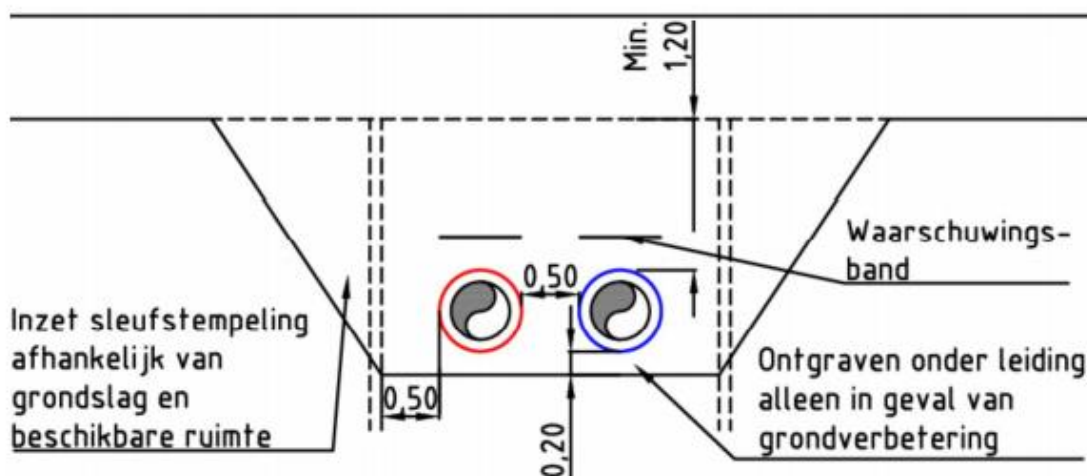
² Wesseling, J.G. 2021. The influence of increased soil temperature on the development of trees. A quick-scan on available literature. WUR.

2 De te verwachten temperatuuroename van de warmteleiding

Tijdens het functioneren van de warmteleiding stroomt er warm water door de leidingen wat warmte aan de omringende grond af zal staan. Het hele jaar door zal er warm water door de leiding stromen dus zowel in de winter als zomer zal de grond rondom de leiding warmer zijn dan de omgeving. Boomwortels zijn gevoelig voor opwarming (zie hoofdstuk 3). Daarom is van belang te weten hoe ver rondom de leiding er een warmtetoename optreedt en hoe hoog die toename is.

De verwachte temperatuuroename is door Deltares³ berekend voor vier locaties in het leiding tracé; één bij de Middachtenweg, twee bij de Moerweg en één in de Kempstraat. De locaties zijn geselecteerd op basis van grondeigenschappen en bodemvochtkenmerken. In de profielen zijn de bodemtemperatuur en het bodemvochtgehalte berekend gedurende meerdere jaren. Het jaar 2020 kan als maatgevend worden beschouwd. De resultaten voor 2020 zijn in het rapport van Deltares in detail beschreven en gebruikt om het effect van de aanwezigheid van de warmteleidingen op de bomen te beoordelen in hoofdstuk 4.

Op de te onderzoeken locaties ligt de leiding minimaal 1,20 meter onder maaiveld. De leiding is daar aangelegd in een open ontgraving, grotendeels binnen verstevigde taludwanden (sleufbekisting). De breedte van de onderkant van die sleuf is 2,9 m en de leidingdiameter is DN 500/710. De temperatuur van de vloeistof in de aanvoerleiding waarmee gerekend is, is 120°C in de winter en 105°C in de zomer als worst case situatie. De afvoerleidingtemperatuur is 70°C in de zomer en 65°C in de winter. Figuur 2.1 geeft een schematische weergave van het sleufprofiel met daarin de leidingen.



Figuur 2-1. Standaardprofiel van de warmteleiding. In rood de aanvoerleiding en in blauw de retourleiding. (uit: van Esch, 2021).

De effecten van de warmteleidingen zijn berekend op vijf dieptes (0,25, 0,5, 1,0, 1,5 en 2,0 m beneden maaiveld) en bij verschillende afstanden van de aanvoerleiding (0,5, 1,0, 2,0 en 5 m). Daarbij is ook rekening gehouden met de variatie in bodemvocht. Een verandering in de waterbeschikbaarheid kan immers ook effecten hebben op de boomwortels en de bomen.

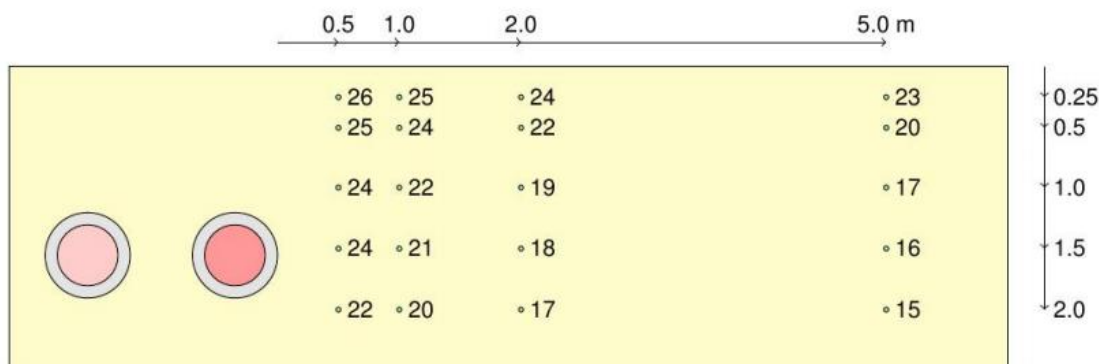
Voor het maken van de berekeningen zijn gegevens over bodemsamenstelling en grondwaterpeilen ingevoerd. De berekeningen laten voor alle vier de locaties een vergelijkbaar resultaat zien:

- Op 5 meter naast de leidingen is het maximale effect op de temperatuur ongeveer 1 graad toename.

³ Esch, van J.M. 2021. Warmteoverdracht stedelijke omgeving warmteleiding Vlaardingen - Den Haag. Deltares

- Op 2 meter naast de leidingen is het effect een toename van 2 - 4 graden
- Op een halve meter naast de leidingen en een halve meter onder maaiveld is de toename ongeveer 1 - 2 graden en een halve meter direct naast de leiding is dat 6 – 8 graden.
- Op locaties met een hogere grondwaterstand is de opwarming minder dan op plaatsen met een lage grondwaterstand
- De verhoging van de temperatuur van een paar graden lijkt geen effect te hebben op het vochtgehalte en waterbeschikbaarheid ter plekke

In figuur 2-2 is de berekende bodemtemperatuur voor de Moerweg weergegeven na aanleg van de warmteleiding. Voor deze effectbeoordeling is van belang dat de maximale temperatuur van de bodem zelfs op slechts een halve meter naast de leiding maar 24 graden is. Dat is dus zelfs nog lager dan de temperatuur dicht aan het maaiveld als deze in de zomer opwarmt onder invloed van de zon.



Figuur 2-2. Gemiddelde bodemtemperatuur in augustus 2020 op verschillende afstanden naast de leidingen, Moerweg (uit: van Esch, 2021).

3 Effect van verhoogde bodemtemperatuur op bomen

Op basis van een korte internetverkenning begin 2021 in het kader van dit onderzoek zijn geen relevante publicaties of andere bronnen gevonden over de effecten van warmteleidingen of andere ondergrondse warmtebronnen op bomengroei. Daarom is Wageningen University & Research opdracht gegeven een literatuuronderzoek te doen naar de gevolgen van verhoogde bodemtemperatuur op de ontwikkeling van bomen. De resultaten daarvan zijn samengevat (Bijlage bij deze memo).

Het eerste wat opviel uit dit literatuuronderzoek was het beperkte aantal publicaties wat gevonden werd over de invloed van bodemtemperatuur op bomen. Verreweg de meeste gevonden literatuur ging over de gevolgen van kortstondige opwarming (bv door bosbrand) of juist de gevolgen van een langdurige maar kleine opwarming, met name in relatie tot de klimaatverandering en opwarming van de aarde. In de laatste categorie is vooral informatie te vinden over hittestress als gevolg van opwarming van de lucht.

Opvallend was dat veel boomsoorten een flinke tolerantie blijken te hebben ten aanzien van temperatuur. Op zich is dat logisch; de luchttemperatuur kan in Nederland variëren van – 20 in de winter tot meer dan +40 graden Celsius in de zomer, zeker in de stad. Bovendien hebben veel in Nederland voorkomende boomsoorten een flink verspreidingsgebied waarbinnen ook gebieden liggen met een duidelijk hogere gemiddelde temperatuur dan Nederland zoals Midden-Frankrijk waar ook onze inheemse eiken, beuken en berken voorkomen en veel van onze aangeplante stadsbomen zoals platanen en kastanjes komen van oorsprong uit duidelijk warmere gebieden.

Onder natuurlijke omstandigheden wordt de bodemtemperatuur van het maaiveld bepaald door zonne-energie via directe instraling en via de luchttemperatuur. De directe zoninstraling en de luchttemperatuur hebben een dag- en nachtritme die op maaiveld temperatuurverschillen tot meer dan 20 graden tussen dag en nacht kan geven. Deze verschillen dempen in de bodem snel uit naar de gemiddelde dagtemperatuur beneden de 20 cm diepte⁴. Onder de 1 meter diepte dempt ook de jaarlijkse temperatuurfluctuatie grotendeels uit en heerst een vrijwel constante temperatuur die overigens onder invloed van klimaatverandering wel langzaam toeneemt. In stedelijk gebied is de gemiddelde temperatuur ordegrrootte 2-3 graden hoger dan op het platteland. Op sommige dagen kan dit warmte-eilandeffect wel oplopen tot 7 graden⁵.

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat kleine veranderingen in de gemiddelde temperatuur, ordegrrootte 1 - 2 graden, al voor flinke veranderingen in ecologische processen te kunnen zorgen zoals:

- Bladeren lopen in het voorjaar eerder uit,
- Het groeiseizoen wordt langer,
- Door bovenstaande effecten komen er meer bladeteende insecten op de bomen af,
- Bladval verteerd sneller en bodemmineralisatie verloopt sneller. Hierdoor komen voedingsstoffen sneller beschikbaar.

Bij een experiment waarbij de bodem kunstmatig 5 graden werd opgewarmd⁶ bleek ook dat bomen en andere planten eerder uitliepen en vroeger bloeiden. Verder bleken er grote verschillen tussen soorten te bestaan. Sommige kregen door de verwarming kleinere bladeren, andere lieten meer diktegroei zien van de stam. Het bleek ook dat vooral kruidachtige planten sterker reageerden dan houtige gewassen.

Bij een experiment waarbij de bodem gedurende 4 maanden tot wel 35 graden werd opgewarmd⁷, bleken er ook weer duidelijk verschillen tussen soorten en effecten. Over het algemeen groeiden de planten sneller bij een verhoogde bodemtemperatuur dan bij de referentie. Een bodemtemperatuur van 35 graden was dus geen belemmering voor deze soorten uit Canada om te groeien.

Er lijkt een relatie te zijn tussen bodemtemperatuur, opgeslagen voedingsstoffen, wortelvorming en CO₂ opname door bladeren. Maar daarover is nog veel onduidelijk. De algemene trend is dat een hogere temperatuur (bodem en/of lucht) zorgt voor een langer groeiseizoen en meer groei. Dat kan wel beperkt worden door de beschikbaarheid van voedsel in de grond en beschikbaar water.

Grotere temperatuurtoenames zijn vooral onderzocht in relatie tot bosbranden. Veel bomen blijken daarbij temperaturen tot 60 graden Celsius te kunnen overleven. Dergelijke temperaturen treden echter maar kort op (minuten) en zijn daarom geen geschikte referentie voor de warmteleiding.

Samenvattend kan gezegd worden over de effecten van een verhoogde bodemtemperatuur:

- Een verhoging van een paar graden zal leiden tot een vroeger en langer groeiseizoen en netto meer groei.
- Een permanente toename van de bodemtemperatuur tot ongeveer 35 graden zal wortelgroei niet dusdanig beïnvloeden dat de bomen schade ondervinden.

⁴ http://projects.knmi.nl/hawa/pdf/Handboek_H11.pdf

⁵ KNMI - Warmte-eilandeffect van de stad Utrecht

⁶ Farnsworth, E.J., Nunez-Farfan, J., Careaga, S.A., Bazzaz, F.A., 1995. Phenology and growth of three temperate forest life forms in response to artificial soil warming. *Journal of Ecology* 83, 967–977. URL: <http://www.jstor.org/stable/2261178>.

⁷ Peng, Y.Y., Dang, Q.L., 2003. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management* 180, 1–9. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00486-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00486-3).

4 Discussie

Uit het feit dat er geen publicaties gevonden zijn over de effecten van warmteleidingen op bomen kan afgeleid worden dat dit nog niet als een duidelijk knelpunt herkend is. Omdat er in Nederland de komende jaren meer warmteleidingen aangelegd zullen worden, is het wel wenselijk hierover meer duidelijkheid te hebben. Deze memo is daarmee een eerste stap om deze kennislacune te vullen. In deze memo is dat gedaan op basis van de modelberekeningen en interpretatie van algemene literatuur. Monitoring van leidingen is wenselijk om meer feitelijke kennis over de relatie bodemwarmte en vegetatie te ontwikkelen.

Op basis modelberekeningen en veldmetingen is voldoende zeker dat tot op 5 meter naast de leidingen de bodemtemperatuur maximaal 1 graad stijgt en dat tot op 2 meter naast de leidingen dit maximaal 4 graden zal zijn en op een halve meter maximaal 6-8 graden. Boven de leidingen neemt de opwarming sneller af, waardoor globaal de bovenste halve meter van het maaiveld maximaal 2 graden opwarmt.

De temperatuur van de buitenkant van de leidingen kan zo hoog worden (meer dan 35 graden) dat het onwaarschijnlijk is dat wortels tot aan de leidingen zelf zullen kunnen groeien. Heel kort kunnen wortels hogere temperaturen mogelijk wel overleven, maar niet langdurig. Op basis van literatuurgegevens is niet exact vast te stellen waar de maximale temperatuurgrens ligt die boomwortels permanent kunnen overleven. Op basis van onderzoek blijkt wel dat soorten die in Canada voorkomen (populier, spar, den) langdurig een bodemtemperatuur van 35 graden langdurig kunnen overleven. Uit het onderzoek van Deltares⁸ komt naar voren dat temperaturen hoger dan 35 graden alleen voor zullen komen op minder dan een halve meter rondom de leidingen. Daarmee lijkt de zone waarbinnen boomwortels zich niet of nauwelijks zullen kunnen ontwikkelen als gevolg van de warmteleiding te beperken tot een dunne laag van minder dan 0,5 meter rondom de leidingen. Inclusief de leidingen en de zone daartussen is dit dus een strook van minder dan 3 meter breed. Zelfs direct boven de leidingen zullen oppervlakkig wortelende bomen in een laag van meer dan 0,5 meter dik wortels kunnen blijven ontwikkelen. De ontwikkeling van vegetaties met gras en kruiden direct boven de leidingen zal daarom ook goed mogelijk blijven.

De verhoogde temperatuur zal het hele jaar optreden. Op basis van literatuurgegevens is te verwachten dat hierdoor het groeiseizoen van de bomen en andere planten wat eerder zal beginnen en wat langer door zal lopen. Grotere bomen hebben een wortelstelsel van 10-20 meter in diameter. De warmteleiding ligt meestal aan de periferie van een dergelijk stelsel, waardoor de warmteleiding vrijwel altijd maar een relatief klein deel van het wortelstelsel van een boom zal beïnvloeden. Het is onduidelijk of ook onder die omstandigheden het groeiseizoen van de hele boom beïnvloed zal worden. Dat lijkt niet waarschijnlijk. Als het grootste deel van het wortelstelsel immers nog in rust is, dan zal de aanvoer van water en nutriënten uit dat deel nog niet op gang komen en is de capaciteit van de boom om vervroegd uit te lopen maar zeer beperkt.

De lokale temperatuurverhoging van de bodem en een deel van het wortelstelsel van een boom als gevolg van de warmteleiding heeft naar verwachting minder effect dan het warmte-eilandeffect van de stad zelf. Daardoor wordt de temperatuur van de hele bodem en omgeving immers een paar graden opgewarmd. Zeker op een zonnig voorjaarsdag zal dit een veel groter effect hebben dan de constante verhoging van een paar graden van een klein deel van het wortelstelsel. Het is veel waarschijnlijker dat er wel een zichtbaar effect is van de warmteleiding op struiken en kruiden die direct boven de leiding groeien en van wie het hele wortelstelsel te maken krijgt met de constante opwarming van een paar graden.

⁸ Esch, van J.M. 2021. Warmteoverdracht stedelijke omgeving warmteleiding Vlaardingen - Den Haag. Deltares

5 Conclusies

- De warmteleiding zorgt voor een constante opwarming van de bodem rondom de leidingen.
- Deze opwarming neemt af met de afstand vanaf de leiding. Hierdoor is op 0,5 meter naast de leiding spraken van maximaal 6-8 graden opwarming en op 2 meter nog maximaal 4 graden. Op 5 meter is dit nog maximaal 1 graad.
- Een kleine verhoging van de gemiddelde temperatuur van de bodem kan leiden tot het eerder uitlopen van bladeren en bloemen, een langer groeiseizoen en een snellere groei.
- Bomen en boomwortels kunnen een temperatuurverhoging van de bodem tot zelfs 35 graden waarschijnlijk zonder problemen aan. Deze temperaturen ontstaan alleen op afstanden van minder dan 50 cm rondom de leidingen.
- Als gevolg van de opwarming van de bodem zal minder dan 50 cm rondom de leidingen ongeschikt worden voor wortelgroei. Boven de leidingen is de afkoeling voldoende om oppervlakkig wortelende soorten bomen, struiken en kruiden te laten groeien.
- Omdat bomen een groot wortelstelsel hebben waarvan hooguit een klein deel enige invloed zal ondervinden van de opgewarmde bodem, zal het effect van de leidingen op de bestaande en toekomstige bomen zeer beperkt zijn en zeker kleiner dan het al bestaande warmte-eiland effect van de stedelijke bebouwing zelf.

Bijlage: The influence of increased soil temperature on the development of trees. A quick-scan on available literature.

The influence of increased soil temperature on the development of trees.

A quick-scan on available literature.

J.G. Wesseling

July 5th, 2021

This document presents the results of a quick-scan of available literature about the influence of soil temperature on the development of trees. To obtain these references, both the (digital) library of Wageningen University and Research and Google Scholar were searched. The number of papers about the subject was surprisingly low. A lot of papers deal with the influence of trees on the soil temperature. Another subject that was found frequently was the influence of short-time high soil temperatures on tree growth, e.g. after a forest fire. See Pausas et al. (2008) for a review. Recently, the influence of the changing air temperature by Global Warming became a hot item. A good example of the latter is the paper by Teskey et al. (2015), who stated that the global land area experiencing heat waves will double by 2020, and quadruple by 2040. Extreme heat events can impact a wide variety of tree functions. At the leaf level, photosynthesis is reduced, photooxidative stress increases, leaves abscise and the growth rate of remaining leaves decreases. In some species, stomatal conductance increases at high temperatures, which may be a mechanism for leaf cooling. At the whole plant level, heat stress can decrease growth and shift biomass allocation. When drought stress accompanies heat waves, the negative effects of heat stress are exacerbated and can lead to tree mortality. However, some species exhibit remarkable tolerance to thermal stress. Responses include changes that minimize stress on photosynthesis and reductions in dark respiration. Although there have been few studies to date, there is evidence of within-species genetic variation in thermal tolerance, which could be important to exploit in production forestry systems. Understanding the mechanisms of differing tree responses to extreme temperature events may be critically important for understanding how tree species will be affected by climate change.

The influence of a permanent higher soil temperature on tree growth has been investigated, but mainly for fruit trees in Japan, e.g. Kadoya (1978). The quick-scan also showed that the majority of the papers concerning the influence of the temperature on trees deals with above-ground temperatures only. A good example of such a paper is presented by Chung et al. (2013), They state that temperature affects a cascade of ecological processes and functions of forests. With future higher global temperatures being inevitable it is critical to understand and predict how forest ecosystems and tree species will respond. This paper reviews experimental warming studies in boreal and temperate forests or tree species beyond the direct effects of higher temperature on plant ecophysiology by scaling up to forest level responses and considering the indirect effects of higher temperature. In direct response to higher temperature (1) leaves emerged earlier and senesced later, resulting in a longer growing season (2) the abundance of herbivorous insects increased and their performance was enhanced and (3) soil nitrogen mineralization and leaf litter decomposition were accelerated.

Besides these generalizations across species, plant ecophysiological traits were highly species-specific. Moreover, it is shown that the effect of temperature on photosynthesis is strongly dependent on the position of the leaf or plant within the forest (canopy or understory) and the time of the year. Indirect effects of higher temperature included among others higher carbon storage in trees due to increased soil nitrogen availability and changes in insect performance due to alterations in plant ecophysiological traits. Unfortunately only a few studies extrapolated results to forest ecosystem level and considered the indirect effects of higher temperature. Chung et al. (2013) conclude that more intensive, long-term studies are needed to further confirm the emerging trends shown in their review.

Soil heating caused by prescribed or wildland fire commonly focuses on a single biological threshold of 60 °C for the duration of one minute to represent organism death. This metric severely misrepresents the heterogeneity of the soil environment, the physiological attributes and tolerances of organisms, and the complexity of heat transfer through soils. Measurements of biotic death in simulated laboratory experiments render research findings difficult to extrapolate to forest and grassland soils. The disparity between assumed biological responses and the diversity of biological responses after wildland fire events calls for a thorough review of soil biological heating thresholds. In their review, Melissa R.A. Pingree (2019) synthesizes and compares research that directly relates soil heating temperature and duration to biological responses, provides relevant models for temperature-duration responses of soil organisms in lieu of a strict threshold, and recommends applications of soil heating data for wildland fire and ecosystem management. For no single study or group of organisms was a threshold of 60 °C for one-minute duration evidenced. All soil organisms reviewed, which included roots, mesofauna, bacteria, fungi, microbial biomass, and soil respiration, displayed both positive and negative responses to soil heating across temperature and duration gradients. Therefore, these authors discourage the use of the traditionally accepted metric of 60 °C for the duration of one minute. Instead, models are presented of duration-temperature relationships of soil biota and invite interdisciplinary efforts from researchers and managers to directly measure biological responses on a case-by-case basis.

Hanson et al. (2017) describe the operational methods to achieve and measure both deep-soil heating (0-3 m) and whole-ecosystem warming (WEW) appropriate to the scale of tall-stature, high-carbon, boreal forest peatlands. The methods were developed to allow scientists to provide a plausible set of ecosystem-warming scenarios within which immediate and longer-term (1 decade) responses of organisms (microbes to trees) and ecosystem functions (carbon, water and nutrient cycles) could be measured. Elevated CO₂ was also incorporated to test how temperature responses may be modified by atmospheric CO₂ effects on carbon cycle processes. The WEW approach was successful in sustaining a wide range of aboveground and belowground temperature treatments (0, 2.25, 4.5, 6.75 and 9 °C) in large 115 m² open-topped enclosures with elevated CO₂ treatments (0 to 500 ppm). Air warming across the entire 10 enclosure study required 90 % of the total energy for WEW ranging from 64238 MJ d⁻¹ during the warm season to 80102 MJ d⁻¹ during cold months. Soil warming across the study required only 1.3 to 1.9 % of the energy used ranging from 954 to 1782 MJ d⁻¹ of energy in the warm and cold seasons, respectively. The residual energy was consumed by measurement and communication systems. Sustained temperature and elevated CO₂ treatments were only constrained by occasional high external winds. This paper contrasts the in situ WEW method with closely related field-warming approaches using both aboveground (air or infrared heating) and belowground-warming methods. It also includes a full discussion of confounding factors that need to be considered carefully in the interpretation of

experimental results. The WEW method combining aboveground and deep-soil heating approaches enables observations of future temperature conditions not available in the current observational record, and therefore provides a plausible glimpse of future environmental conditions.

Experimental soil heating and its influence on the growth of trees is described by e.g. Farnsworth et al. (1995). They describe the results of an experiment where the soil is artificially heated by electrical power lines up to 5 °C above the ambient temperature. They conclude that: i. Responses of temperate deciduous forest vegetation to artificial soil warming (simulating one component of projected global climate change) were investigated in field plots over two growing seasons, 1992-93. Six replicate plots were established for each of three treatments: heating, disturbance-control, and intact control. Growth and phenology of 26 species of three life forms (12 herbaceous understorey species; six shrub species; eight tree species) were monitored non-destructively in the plots at 20 sampling dates. ii. Phenology of leaf emergence and flower production in saplings was not affected by soil warming. Mature trees and shrubs leafed out slightly earlier and in larger numbers in heated plots. Trees flowered earlier and in higher proportions in the heated plots in 1993. iii. Mean area per leaf per plant and leaf expansion rates in 1992 were greatest in control saplings of *Acer pensylvanicum* and *Fagus grandifolia*. *Vaccinium corymbosum*, a shrub, showed reduced leaf sizes under soil heating. iv. Soil warming significantly enhanced relative diameter growth of woody individuals, especially shrubs, in 1992. This effect was less pronounced in 1993. v. Species richness was lower in heated plots than in intact control plots at all sampling dates in both years. Disturbed but unheated control plots exhibited the lowest species richness overall. Species richness declined in all plots in 1993. vi. Changes in relative abundance of herbaceous species from 1992 to 1993 were highly variable, and not significantly affected by treatment. Rank abundances of species changed more from 1992 to 1993 in intact control plots than in the other two treatments. vii. Total density (stems m⁻²) of herbaceous species was highest in heated plots during April and May of both years, reflecting accelerated emergence of *Maianthemum canadense* and *Uvularia sessilifolia*. From June through October, however, intact control plots exhibited the highest stem densities, as numbers of the early emergents declined. viii. Photosynthetic rates of the dominant herbs, *Maianthemum canadense* and *Uvularia sessilifolia*, were not significantly affected by heating. ix. Of all life forms, herbaceous species were most sensitive to soil warming. Their early appearance could influence carbon and nutrient acquisition dynamics under changed climatic conditions in deciduous forests.

Pregitzer et al. (2000) presents a literature review on the influence of soil temperature on the fine roots of trees. They state that soil temperature can influence the functioning of roots in many ways. If soil moisture and nutrient availability are adequate, rates of root length extension and root mortality increase with increasing soil temperature, at least up to an optimal temperature for root growth, which seems to vary among taxa. Root growth and root mortality are highly seasonal in perennial plants, with a flush of growth in spring and significant mortality in the fall. At that time, it was not understood whether root growth phenology responds to the same temperature cues that are known to control shoot growth. It was also not understood whether the flush of root growth in the spring depends on the utilization of stored nonstructural carbohydrates, or if it is fueled by current photosynthate. Root respiration increases exponentially with temperature, but Q values range widely from c. 1.5 to 3.0. Significant questions to be resolved were : whether rates of root respiration acclimate to soil temperature, and what mechanisms control acclimation if it occurs. Limited data suggest that fine roots depend heavily on the import of new carbon (C) from the canopy

during the growing season. It was hypothesized that root growth and root respiration are tightly linked to whole-canopy assimilation through complex source–sink relationships within the plant. The understanding of how the whole plant responds to dynamic changes in soil temperature, moisture and nutrient availability was poor, even though it was well known that multiple growth-limiting resources change simultaneously through time during a typical growing season. The authors review the interactions between soil temperature and other growth-limiting factors to illustrate how simple generalizations about temperature and root functioning can be misleading.

Kuiper (1964) mentions a decrease in water uptake at lower temperatures that is caused by a decrease in root growth and in water permeability of the cell membrane and an increase in viscosity of water and of protoplasm. He presents experimental data on water uptake as affected by root temperature for white pine, cabbage, cotton and water melon. The decrease in water absorption of white pine (A) and cabbage (B) in the range of soil temperatures from 5 °C to 25 °C seems to be entirely due to an increase in viscosity of water. The effect of root temperature on water uptake of intact bean plants under high transpiration conditions has been studied. In general, two temperature ranges could be distinguished, one with a high, and one with a low Q_{10} -value. Above a certain 'critical temperature' only the effect of viscosity of water could be observed as limiting water uptake, indicating the existence of permanent water-filled pores in the root cell membranes. Below this critical temperature the root cell membranes are assumed to be more homogeneous and characterized by a high potential energy barrier for water. Water transport then appears to be limited by the capacity of a metabolic process involved in the establishment of the membrane structure. The critical temperature strongly depends on culture conditions during growth.

In Canada an experiment was performed where one-year old seedlings of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.), black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss), and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) were subject to seven soil temperatures (5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 °C) for 4 months. According to Peng and Dang (2003), all aspen seedlings, about 40% of jack pine, 20% of white spruce and black spruce survived the 35 °C treatment. The seedlings were harvested at the end of the fourth month to determine biomass and biomass allocation. It was found that soil temperature, species and interactions between soil temperature and species significantly affected root biomass, foliage biomass, stem biomass and total mass of the seedling. The relationship between biomass and soil temperature was modeled using third-order polynomials. The model showed that the optimum soil temperature for total biomass was 22.4, 19.4, 16.0 and 13.7 °C, respectively, for jack pine, aspen, black spruce and white spruce. The optimum soil temperature was higher for leaf than for root in jack pine, aspen and black spruce, but the trend was the opposite for white spruce. Among the species, aspen was the most sensitive to soil temperature: the maximum total biomass for aspen was about 7 times of the minimum value while the corresponding values were only 2.2, 2.4 and 2.3 times, respectively, for black spruce, jack pine and white spruce. Soil temperature did not significantly affect the shoot/root (S/R) ratio, root mass ratio (RMR), leaf mass ratio (LMR), or stem mass ratio (SMR) ($P > 0.05$) with the exception of black spruce which had much higher S/R ratios at low (5 °C) and high (30 °C) soil temperatures. There were significant differences between species in all the above ratios ($P < 0.05$). Aspen and white spruce had the smallest S/R ratio but highest RMR while black spruce had the highest S/R but lowest RMR. Jack pine had the highest LMR but lowest SMR while aspen had the smallest LMR but highest SMR. Both LMR and SMR were significantly higher for black spruce than for white spruce.

According to Pregitzer et al. (2000), soil temperature can influence the functioning of roots in many ways. If soil moisture and nutrient availability are adequate, rates of root length extension and root mortality increase with increasing soil temperature, at least up to an optimal temperature for root growth, which seems to vary among taxa. Root growth and root mortality are highly seasonal in perennial plants, with a flush of growth in spring and significant mortality in the fall. At present we do not understand whether root growth phenology responds to the same temperature cues that are known to control shoot growth. We also do not understand whether the flush of root growth in the spring depends on the utilization of stored nonstructural carbohydrates, or if it is fueled by current photosynthate. Root respiration increases exponentially with temperature, but Q10 values range widely from c. 1.5 to \geq 3.0. Significant questions yet to be resolved are: whether rates of root respiration acclimate to soil temperature, and what mechanisms control acclimation if it occurs. Limited data suggest that fine roots depend heavily on the import of new carbon (C) from the canopy during the growing season. We hypothesize that root growth and root respiration are tightly linked to whole-canopy assimilation through complex source-sink relationships within the plant. Our understanding of how the whole plant responds to dynamic changes in soil temperature, moisture and nutrient availability is poor, even though it is well known that multiple growth-limiting resources change simultaneously through time during a typical growing season. The authors review the interactions between soil temperature and other growth-limiting factors to illustrate how simple generalizations about temperature and root functioning can be misleading.

Heninger and White (1974) investigated the effect of soil temperature on shoot and root development for three conifers and two broadleaved species. Plants were raised from seed through two 8-week stages in environmental chambers with soil temperatures controlled in constant-temperature water baths. Soil temperatures were 15, 19, 23, 27, and 31°C and soil moisture between 0.1 and 1.5 bars soil water suction. Other environmental factors were held constant at simulated natural levels. White spruce and tree-of-heaven had optimal shoot and root growth at 19°C. Jack pine growth was maximum at 27°C. Douglas-fir seedlings developed well between 15 and 27°C. Paper birch grew well between 19 and 31°C with best shoot development at 31°C, whereas root development was favored at 23°C.

Domisch et al. (2001) studied effects of soil temperature on shoot and root extension growth and biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings at the beginning of the growing season. One-year-old Scots pine seedlings were grown for 9 weeks at soil temperatures of 5, 9, 13 and 17 °C and an air temperature of 17 °C. Date of bud burst, and the elongation of shoots and roots were monitored. Biomass of current and previous season roots, stem and needles was determined at 3-week intervals. Starch, sucrose, glucose, fructose, sorbitol and inositol concentrations were determined in all plant parts except new roots. The timing of both bud burst and the onset of root elongation were unaffected by soil temperature. At Week 9, height growth was reduced and root extension growth was much less at a soil temperature of 5 °C than at higher soil temperatures. Total seedling biomass was lowest in the 5 °C soil temperature treatment and highest in the 13 °C treatment, but there was no statistically significant difference in total biomass between seedlings grown at 13 and 17 °C. In response to increasing soil temperature, belowground biomass increased markedly, resulting in a slightly higher allocation of biomass to belowground parts. Among treatments, root length was greatest at a soil temperature of 17 °C. The sugar content of old roots was unaffected by soil temperature, but the sugar content of new needles increased with increasing

soil temperature. The starch content of all seedling parts was lowest in seedlings grown at 17 °C. Otherwise, soil temperature had no effect on seedling starch content.

Ceccon et al. (2011) identified the role of various soil parameters and root density as drivers of soil respiration (R_s) in an apple orchard, measured during different periods of the year and at a range of distances from trees, in plots with a different history of nutrient supply. R_s was measured in April, May, August and December and studied in relation to soil temperature and moisture, total soil C and N, as well as to fine root density and medium-, and large-sized root density and root N concentration. The study also aimed to partition R_s by applying the root regression technique. R_s ranged between 0.06 in December and 1.49 g CO₂ m⁻² h⁻¹ in August. Average soil temperature alone explained up to 71% of the annual variability of R_s , while soil water content was negatively correlated to R_s . Fertilization, soil C and N concentration and root N had negligible effects on R_s . Fine root density, but not medium- and large-sized root density, contributed to explaining part of the yearly variability of R_s and proved to be a good predictor in December, when the statistical significance of the regression made it possible to estimate the autotrophic component of R_s as being about 3% of total soil respiration.

Several authors (e.g. Lopushinsky and Max (1990), Kuhns et al. (1985)) investigated the influence of soil temperature on the growth of roots of trees. Lopushinsky and Max (1990) found that root growth in seedling transplants of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), Pacific silver fir (*Abies amabilis*(Dougl.) Forbes), noble fir (*Abies procera* Rehd.), lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) and ponderosa pine (*Pines ponderosa* Dougl. ex Laws.) began when soil temperature exceeded 5 °C. Root growth increased rapidly after 10 °C and attained maximum values at 20 °C. At 30 °C, no root growth occurred in the firs; in the pines, root growth was 30 to 39% of maximum. Maximum shoot growth also occurred at 20 °C. In ponderosa pine, height growth of seedlings from a high-elevation source was unaffected by cold soil, but in low-elevation seedlings it was reduced. Budburst in Douglas-fir and the pines was delayed up to 11 days by cold soil, whereas in silver fir and noble fir, it was only slightly delayed. Prior to new root growth in ponderosa pine, xylem pressure potentials and stomatal conductances during the afternoon indicated reduced stomatal opening at all soil temperatures, whereas 23 days later, stomata were open to a greater degree when temperatures exceeded 10 °C. Kuhns et al. (1985) evaluated the effects of soil temperature, soil water potential, and leaf water potential on root length growth, number of growing roots, and suberization for three mature black walnut (*Juglans nigra* L.) trees in an oak-hickory forest in central Missouri. Rhizotrons were used to access the root systems. When only roots growing in wet soils were included, growth began at a soil temperature of 4°C and increased slowly to 13°C, with a more rapid increase above that. Growth rate peaked at 17° to 19°C and the number of growing roots peaked at 21°C, the highest temperature observed. When roots in dry soil were the only ones included in the analysis, root growth was low with a peak at 17°C. Root growth and number of growing roots decreased sharply as soil water potential decreased from 0 to -0.5 MPa, and approached zero as soil water potential went from -0.5 to -1.0 MPa. At low and high soil temperatures suberization rate was high, and at intermediate temperatures it was low. Suberization rate was low at high water potentials and increased as the soil dried.

Effects of climate warming on ecosystem productivity are strongly influenced by those on mineralization and uptake of key soil nutrients, particularly N. Models used to project these effects must therefore include a comprehensive and fully coupled N cycle which has undergone

rigorous testing. Grant (2014) mentions that key hypotheses governing the response of the N cycle to warming in the terrestrial ecosystem model *ecosys* were tested against changes in ecosystem C and N stocks measured during 7 years of 5°C soil heating in the Harvard soil heating experiment. These hypotheses enabled the model to simulate gains in plant C stocks that rose from 50 to 200 g C m⁻² y⁻¹ driven by increased N mineralization and uptake as the soil heating experiment progressed. However these gains were offset by continuing losses of soil C stocks from 125 to 250 g C m⁻² y⁻¹ driven by increased heterotrophic respiration, so that total C stocks changed little with soil heating. Both gains and losses in the model were consistent with those measured in the soil heating experiment. The changes in N cycling with soil heating on which these model results were based were further corroborated by comparing modeled vs. measured increases in soil N mineralization rates, foliar N contents and reductions in root phytomass, and by comparing modeled increases in CO₂ fluxes and net primary productivity with those reported in meta-analyses of warming effects on ecosystem productivity. However when the model was run under gradual climate warming by 5°C per century, these modeled changes in N cycling drove gains in ecosystem C stocks that rose gradually to ca. 165 g C m⁻² y⁻¹ after 100 years. The greater gain in ecosystem C modeled under gradual climate warming vs. sudden soil heating was attributed to much smaller losses in soil C stocks.

As a conclusion, it may be seen that changes in soil temperature interact with changes in other essential resources. For example, both water and nutrient availability often covary with changes in soil temperature. Higher soil temperatures result in increased nitrogen (N) mineralization if soil waterpotential does not limit microbial activity, see e.g. Pregitzer et al. (2000). Most types of trees can adapt to changing temperatures. Only when the higher temperature is accompanied by a shortage on soil moisture, severe damage may occur, see e.g. Teskey et al. (2015).

References

- Ceccon, C., Panzacchi, P., Scandellari, F., Prandi, L., Ventura, M., Russo, B., Millard, P., Tagliavini, M., 2011. Spatial and temporal effects of soil temperature and moisture and the relation to fine root density on root and soil respiration in a mature apple orchard. *Plant and Soil* 342, 195–206. doi:10.1007/s11104-010-0684-8.
- Chung, H., Muraoka, H., Nakamura, M., Han, S., Muller, O., Son, Y., 2013. Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems: a literature review. *Journal of Plant Research* 126, 447–460. URL: <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0565-3>, doi:10.1007/s10265-013-0565-3.
- Domisch, T., Finér, L., Lehto, T., 2001. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season. *Tree Physiology* 21, 465–472. URL: <https://doi.org/10.1093/treephys/21.7.465>, doi:10.1093/treephys/21.7.465.
- Farnsworth, E.J., Nunez-Farfan, J., Careaga, S.A., Bazzaz, F.A., 1995. Phenology and growth of three temperate forest life forms in response to artificial soil warming. *Journal of Ecology* 83, 967–977. URL: <http://www.jstor.org/stable/2261178>.
- Grant, R., 2014. Nitrogen mineralization drives the response of forest productivity to soil

- warming: Modelling in ecosys vs. measurements from the harvard soil heating experiment. *Ecological Modelling* 288, 38–46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.05.015>.
- Hanson, P.J., Riggs, J.S., Nettles, W.R., Phillips, J.R., Krassovski, M.B., Hook, L.A., Gu, L., Richardson, A.D., Aubrecht, D.M., Ricciuto, D.M., Warren, J.M., Barbier, C., 2017. Attaining whole-ecosystem warming using air and deep-soil heating methods with an elevated CO₂ atmosphere. *Biogeosciences* 14, 861–883. doi:10.5194/bg-14-861-2017.
- Heninger, R.L., White, D.P., 1974. Tree seedling growth at different soil temperatures. *Forest Science* 20, 363–367. URL: <https://doi.org/10.1093/forestscience/20.4.363>, doi:10.1093/forestscience/20.4.363, arXiv:<https://academic.oup.com/forestscience/article-pdf/20/4/363/23060746/forestscience>
- Kadoya, K., 1978. Studies on the hydrophysiological rhythms of citrus trees. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 47, 167–171. doi:10.2503/jjshs.47.167.
- Kuhns, M.R., Garrett, H.E., Teskey, R.O., Hinckley, T.M., 1985. Root Growth of Black Walnut Trees Related to Soil Temperature, Soil Water Potential, and Leaf Water Potential. *Forest Science* 31, 617–629. doi:10.1093/forestscience/31.3.617.
- Kuiper, P., 1964. Water uptake of higher plants as affected by root temperature. *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen* 64-4 , 11 pp.
- Lopushinsky, W., Max, T., 1990. Effect of soil temperature on root and shoot growth and on budburst timing in conifer seedling transplants. *New Forests* 4, 107–124. doi:10.1007/BF00119004.
- Melissa R.A. Pingree, L.N.K., 2019. The myth of the biological threshold: A review of biological responses to soil heating associated with wildland fire. *Forest Ecology and Management* 432, 1022–1029. doi:10.1016/j.foreco.2018.10.032.
- Pausas, J., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, R., 2008. Are wildfires a disaster in the mediterranean basin? a review. *Int. J. Wildland Fire* 17, 713–723. URL: <https://doi.org/10.1071/WF07151>.
- Peng, Y.Y., Dang, Q.L., 2003. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management* 180, 1–9. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00486-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00486-3).
- Pregitzer, K.S., King, J., Burton, A., Brown, S., 2000. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist* 147, 105–115. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00689.x>.
- Teskey, R., Wertin, T., Bauweraerts, I., Ameye, M., McGuire, M., Steppe, K., 2015. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant, Cell & Environment* 38, 1699–1712. doi:<https://doi.org/10.1111/pce.12417>.