

Ruimtelijke correlatie tussen bodemdaling en spoorligging

Veli Alkan

Ruimtelijke correlatie tussen bodemdaling en spoorligging

In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?

Student: Veli Alkan
Studentnummer: 3026193
Opleiding: Geo Media & Design
Opdrachtgever: Aeres Hogeschool Almere
Plaats: Soest
Datum: 05-08-2021
Afstudeerdocent: Karin Wilterdink
Begeleider binnen Strukton Rail: Bekir Koncak

DISCLAIMER

Dit rapport is gemaakt door een student van Aeres Hogeschool als onderdeel van zijn/haar opleiding. Het is géén officiële publicatie van Aeres Hogeschool. Dit rapport geeft niet de visie of mening van Aeres Hogeschool weer. Aeres Hogeschool aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade voortvloeiend uit het gebruik van de inhoud van dit rapport.

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeropdracht 'Ruimtelijke correlatie tussen bodemdaling en spoorligging'. Het onderzoek voor deze afstudeeropdracht is uitgevoerd bij Strukton Rail Nederland. Deze opdracht is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Geo, Media & Design aan de Aeres Hogeschool Almere. Dit onderzoek is geschreven in de periode van april 2021 tot augustus 2021.

Samen met mijn stagebegeleider Bekir Koncak bij Strukton Rail Nederland en afstudeercoach Karin Wilterdink heb ik het onderwerp en onderzoeksvraag opgesteld. Door de goede communicatie tijdens mijn onderzoek met mijn stagebegeleider Bekir Koncak en afstudeercoach Karin Wilterdink ben ik goed op weg geholpen. Om deze reden wil ik Bekir Koncak en Karin Wilterdink bedanken voor hun input en de begeleiding tijdens het afstuderen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Veli Alkan

Soest, 5 augustus 2021

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
Summary	6
1. Inleiding	7
1.1 Mobiliteit en spoorwegen in Nederland	7
1.2 Bodemdaling een sluipend probleem in Nederland	10
1.3 De bodem	11
1.4 Spoorligging	15
1.5 Knowledge gap	17
1.6 Afbakening	17
1.7 Vraagstelling	18
1.8 Doelstelling	18
1.9 Leeswijzer	19
2. Aanpak	20
2.1 Onderzoeksmethode	20
2.2 Onderzoeksmethode per deelvraag	20
3. Resultaten	23
3.1 Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling	23
3.2 Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken	26
3.3 Deelvraag 3: Is er een statistisch verband met spoorliggingsproblemen en bodemdaling	28
4. Discussie	29
4.1 Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling?	29
4.2 Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken?	30
4.3 Deelvraag 3: Is er een statistisch verband met spoorligging-problemen en bodemdaling?	31
5. Conclusie en aanbevelingen	32
5.1 Conclusie	32
5.2 Aanbevelingen	33
5.3 Vervolgonderzoek	33
Literatuurlijst	34
Bijlage I Interviewprotocol m.b.t. het stopplan	37
Bijlage II Data verzamelen deelvraag 1	38

Bijlage III Data prepareren deelvraag 1	39
Bijlage IV Data analyseren deelvraag 1	44
Bijlage V Data verzamelen en prepareren deelvraag 2	45
Bijlage VI Data prepareren deelvraag 3	46
Bijlage VII Data analyseren deelvraag 3	47

Samenvatting

Gebreken in de spoorligging kunnen diverse gevolgen hebben op de spoorinfrastructuur en het herstellen van die gebreken kan oplopen tot tientallen duizenden euro's. Strukton Rail is verantwoordelijk voor de onderhoud aan het spoor in zeven contractgebieden in Nederland.

In 2019 zijn door Eurailscout metingen uitgevoerd waaruit een gis-service is ontwikkeld. In de gis-service houdt het bedrijf de gebreken in de spoorgeometrie bij en afhankelijk van de prioriteit van het probleem worden herstelwerkzaamheden uitgevoerd. Er kunnen verschillende oorzaken zijn die de spoorligging kunnen beïnvloeden, zoals baanbelasting, kunstwerken, duikers en overwegen. Het is echter onduidelijk en niet onderzocht of de spoorliggingsproblemen ook door de bodemdaling veroorzaakt kunnen worden.

Het doel van dit onderzoek is om te achterhalen of er een verband is tussen de spoorliggingsproblemen en bodemdaling. Het onderzoek richt zich op de spoorliggingsproblemen die door Eurailscout zijn gemeten in klei- en veengronden binnen de contractgebieden van Strukton Rail. Hiervoor is de volgende vraagstelling opgesteld: *'In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?'*

Om deze hoofdvraag te beantwoorden is er een kwalitatief en kwantitatief onderzoek uitgevoerd. Kwantitatief om naar verbanden te zoeken, en kwalitatief om inzicht te krijgen in de ernst van de gemeten gebreken. Daarnaast zijn er door middel van desk- en fieldresearch data verzameld en geanalyseerd.

Het onderzoek is uitgevoerd middels drie deelvragen. Als eerste is de mate van de bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail onderzocht. Daarna is er gekeken in welke contractgebied de meeste gebreken zijn gemeten. Als laatste is er nagegaan of er een verband is tussen de bodemdaling en de spoorliggingsproblemen.

Uit de resultaten blijkt dat de bodem nabij de gemeten gebreken sneller daalt ten opzichte van de bodemdaling binnen twee meter van het spoor over het hele contractgebied. Daarnaast blijkt uit de resultaten dat de mate van bodemdaling in de contractgebieden geen relatie heeft met de ernst van de gemeten gebreken. Ook is gebleken dat het contractgebied met de snelste bodemdaling niet over de meeste gemeten gebreken beschikt.

Het advies voor een vervolgonderzoek is om de scope op een specifieke locatie te leggen en meerdere criteria mee te nemen voor een uitgebreider onderzoek.

Summary

Track laying problems can have serious consequences on the rail infrastructure and repairing the defects can amount to tens of thousands of euros. Strukton Rail has seven contract areas in the Netherlands and is responsible for track maintenance during the contract period.

In 2019, measurements were taken by Eurailscout out of which a gis service was developed. The company keeps track of deficiencies in track geometry in the gis-service and depending on the priority of the deficiency, repair work is carried out. There can be several causes that can affect track alignment, such as track loading, structures, culverts and level crossings. However, it is unclear and not investigated whether track layout problems can also be caused by subsidence or if there is a relationship.

The purpose of this study is to find out if there is a relationship between track-laying problems and land subsidence. The research focuses on the track layout problems measured by Eurailscout in the contract areas of Strukton Rail and in the clay and peat soils in the Netherlands. For this purpose, the following question was formulated: 'To what extent does a spatial correlation exist between track-laying deficiencies and land subsidence in the contract areas of Strukton Rail Netherlands?'

To answer this main question, a qualitative and quantitative study was carried out. Quantitatively to look for correlations, and qualitatively to gain insight into the measured defects. In addition, data was collected and analyzed through desk and field research. In the coming paragraphs the approach per sub-question will be discussed in detail.

The research was carried out by means of three sub-questions. Firstly, the extent of soil subsidence in the contract areas of Strukton Rail was investigated. Next, we examined in which contract area the most deficiencies were measured. Finally, it was examined whether there is a link between soil subsidence and track layout problems.

The results show that the soil around the measured defects subsides faster compared to the soil subsidence within two meters of the track over the entire contract area. In addition, the results show that the rate of subsidence in the contract areas have no relationship with the severity of the measured deficiencies. It was also found that the contract area with the fastest rate of subsidence does not have the most measured deficiencies.

The recommendation for a follow-up study is to put the scope on a specific location and include multiple criteria for a comprehensive study.

1. Inleiding

In 2019 reisden er dagelijks gemiddeld 1,3 miljoen reizigers met de trein in Nederland. Het aantal treinreizigers is tussen de periode van 2015 en 2019 toegenomen met 0,2 miljoen reizigers. In 2015 reisden gemiddeld 1,1 miljoen mensen met de trein in 2019 stond het aantal reizigers op 1,3 miljoen (NS, 2020). ProRail verwacht een groei van dertig procent meer reizigers- en goederenvervoer in 2040 (ProRail, z.d.-a). Het openbaar vervoer, en met name de trein is een belangrijk vervoersmiddel om reizigers tussen de steden op een duurzame, kostenefficiënte en ruimte efficiënte wijze te verplaatsen.

De groei van de bevolking en de verstedelijking van Nederland hebben invloed op de vraag naar mobiliteit. Echter, er is een probleem. Een toenemend aantal mensen woont namelijk in de kustgebieden van Nederland waar de ondergrond uit zachte bodems van veen en klei bestaat. In deze bodems vindt bodemdaling plaats die aanzienlijke maatschappelijk en economische gevolgen heeft.

Strukton Rail is één van de spooraannemers in Nederland die verantwoordelijk is voor het onderhoud van het spoor. De missie van het bedrijf is om bij te dragen aan de veiligheid, kwaliteit en duurzaamheid van het spoorvervoer. Daarbij is de spoorligging uiterst belangrijk voor een veilig spoorwegnet. Echter, er kunnen gebreken ontstaan in de spoorligging die voor grote financiële kosten zorgen. Het inzetten van een werktrein om het spoor weer goed te zetten kan oplopen tot €20.000 á €30.000 per nacht.

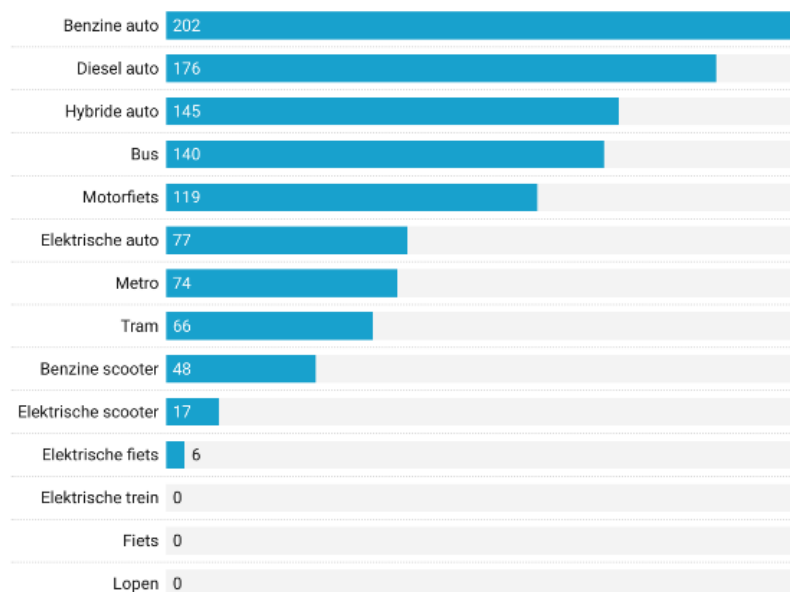
Het onderzoeken en voorspellen of de gebreken door bodemdaling veroorzaakt worden, zou Strukton Rail en soortgelijke spooraannemers in de toekomst kunnen helpen bij het anticiperen op deze gebreken en in het maken van een tender calculatie.

1.1 Mobiliteit en spoorwegen in Nederland

De benenwagen (lopen en fietsen) is het beste voor het milieu omdat een persoon zelf dan de motor is en er geen CO₂ wordt uitgestoten. De trein is daarna het beste vervoermiddel voor het milieu, omdat de treinen in 2017 zijn overgegaan naar groene energie en honderd procent op windstroom worden gereden, zoals ook te zien is op Figuur 1 en Figuur 2 (Milieucentraal, z.d.). Nederland is het eerste land in de wereld dat groene energie toepast in het spoorwegnet. Treinreizigers mogen dan ook gezien worden als CO₂-neutraal reizigers. Toch is de auto het populairst vervoermiddel onder de Nederlanders. Dit blijkt uit een analyse uit het *Onderzoek Verplaatsingen in Nederland (OVIN) 2017* dat door het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) werd uitgevoerd (CBS, 2018).

CO₂-uitstoot per reizigerskilometer (in gram)

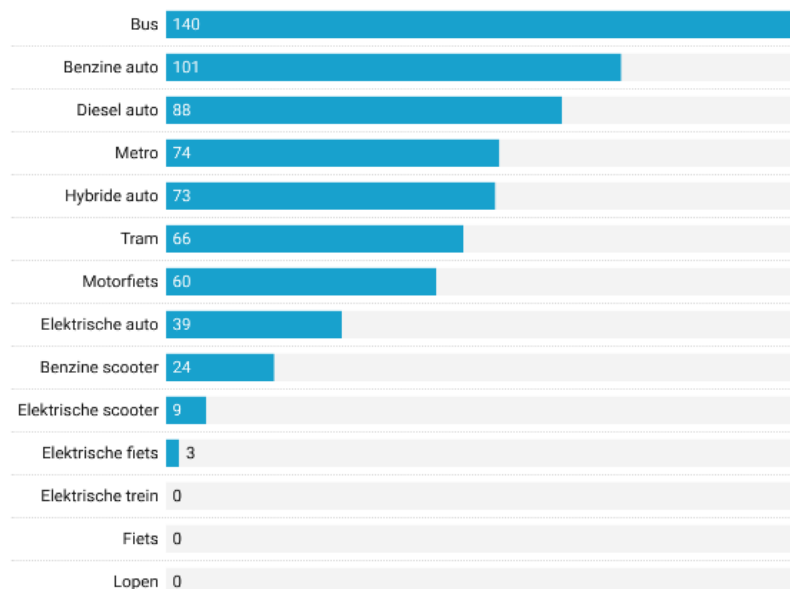
1 persoon



Figuur 2 CO₂ -uitstoot per reizigerskilometer 1 persoon

CO₂-uitstoot per reizigerskilometer (in gram)

2 Personen



Figuur 1 CO₂ -uitstoot per reizigerskilometer 2 personen

In 1839 begint de geschiedenis van de spoorwegen in Nederland. Toen werd een belangrijke stap in de spoorinfrastructuur gezet door het aanleg van de eerste spoorlijn van Amsterdam naar Haarlem. In december 2019 bestaat het spoor al 180 jaar en er is door de jaren heen veel veranderd aan het spoornetwerk in Nederland. In de afgelopen 180 jaar is het aantal kilometers spoor aanzienlijk toegenomen en ligt er nu een spoor van 7.097 kilometer lang in Nederland, terwijl er in 1860 nog maar driehonderd kilometer spoor lag (ProRail, 2019). De spoorwegen werden tot 1860 door private spoorwegmaatschappijen aangelegd en de staat speelde geen rol bij de aanleg en de exploitatie. In 1860, met de komst van het Spoorwegwet, besloot de staat om het initiatief over te nemen, omdat het aanleg van sporen niet snel genoeg ging (Cavallo, 2007).

Met de oprichting van N.V. Nederlandse Spoorwegen (NS) in 1939, nam de NS het spoornetwerk in beheer tot 1995. Na de reorganisatie in 1995 van de NS is de NS Railinfratrust B.V. opgericht die later in 2002 uit de NS-holding is gehaald, en verder is gegaan onder de naam 'ProRail'. Op 1 januari 2005 fuseerden Railinfrabeheer, Railverkeersleiding en Railned tot ProRail B.V. (Actorenregister, z.d.).

Na de oprichting van ProRail in 2005 is door de minister van Verkeer en Waterstaat een tienjarig beheerconcessie verleend aan ProRail voor het beheer van de Nederlandse spoorweginfrastructuur. In december 2014 is met het besluit van staatssecretaris Mansveld de beheerconcessie van de hoofdspoorweginfrastructuur voor de periode 2015-2025 verleend aan ProRail (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014).

ProRail is als spoorbeheerder verantwoordelijk voor het spoorwegnet. Daaronder valt: Aanleg, onderhoud, behoud en veiligheid. Echter, de werkzaamheden aan het spoor worden niet uitgevoerd door ProRail, maar door gecertificeerde spoooraannemers, zoals Strukton Rail, Bam Infra Rail, ASSET Rail en VolkerRail. ProRail contracteert de spoorwerkzaamheden uit aan de spoooraannemers door middel van een prestatiegericht onderhoudscontract (PGO).



Figuur 3. PGO-contractgebieden Nederland (ProRail, z.d.-a).

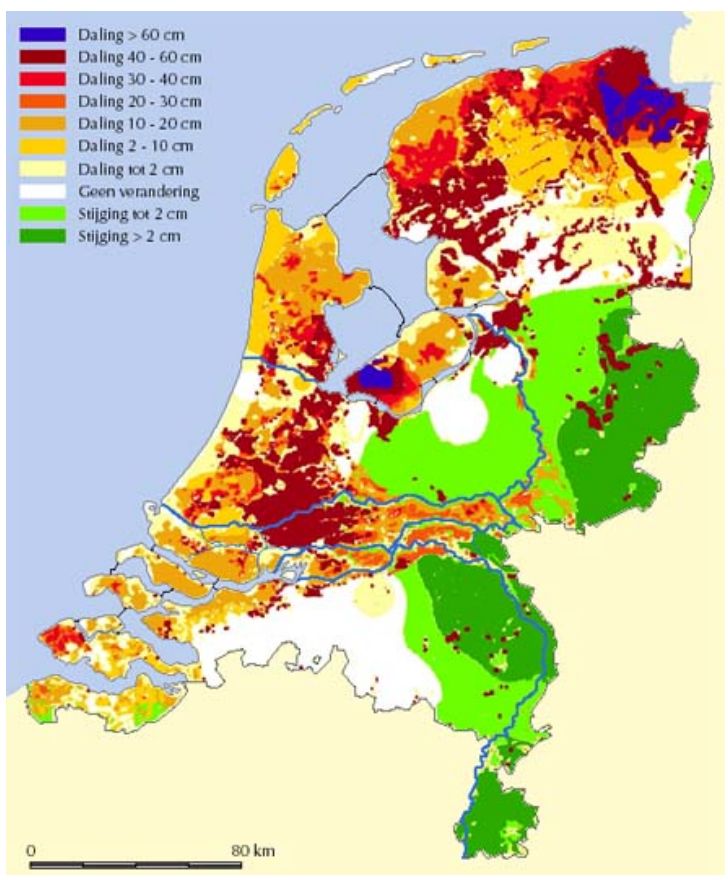
Strukton Rail heeft zeven contractgebieden in 2021 en is verantwoordelijk voor een groot deel van het onderhoud in een geografisch afgebakende contractgebied gedurende de PGO-contract periode die vijf jaar duurt (SpoorPro, 2019). In totaal zijn er 21 contractgebieden in Nederland, zoals te zien is op Figuur 3 (ProRail, z.d.-a). Om de vijf jaar geeft ProRail het contractgebied vrij na afloop van het contract, en worden de contractgebieden opnieuw aanbesteed. Het doel van een PGO-contract is het verminderen van storingen, efficiënter onderhoud en een hogere veiligheid (ProRail, z.d.-a).

1.2 Bodemdaling een sluipend probleem in Nederland

Bodemdaling is het proces waarbij een niveau van de bodem zakt ten opzichte van een referentiepunt, bijvoorbeeld het Normaal Amsterdams Peil (NAP) (Van Asselen et al., 2020). Door historisch landgebruik en door menselijke activiteiten, zoals verlaging van de grondwaterstand en de verstedelijking op de zachte bodems van veen en klei, wordt bodemdaling veroorzaakt (Van Asselen et al., 2018). De zachte bodems komen vooral voor in de laaggelegen kustgebieden van Nederland.

Het fenomeen bodemdaling is wereldwijd een toenemend probleem in de laaggelegen kustgebieden. Terwijl de zeespiegel stijgt, daalt het landoppervlak in deze gebieden waardoor een derde van Nederland onder het gemiddelde zeeniveau ligt (Hoogland et al., 2012). Bodemdaling heeft een reeks gevolgen, waaronder een grotere kans op overstroming, verzilting van het grondwater, schade aan gebouwen en infrastructuur (Hoogland et al., 2012).

Het Nederlandse landoppervlakte bestaat voor ruim tien procent uit veen (PBL, 2016). Dit percentage komt overeen met een oppervlakte van 4.154 km². Over de laatste duizend jaar is de bodem tot vier meter gedaald in Nederland, en naar verwachting daalt de bodem met 140 millimeter in één jaar. Uit Figuur 4 valt af te leiden wat de verwachting is van de bodemdaling in Nederland voor het jaar 2050, ten opzichte van nu (Rijkswaterstaat, z.d.). De snelheid en de mate van bodemdaling wordt bepaald door tijd, ruimte, dikte van de deklaag, het gehalte van organisch materiaal en de diepte van de grondwaterstand (Van Asselen et al., 2018).



Figuur 4 De verwachte bodemdaling en stijging voor Nederland in 2050 (Rijkswaterstaat, z.d.).

Uit een onderzoek van het Rijkswaterstaat (z.d.) blijkt dat menselijke activiteiten tot maximaal 2,5 centimeter per jaar kunnen bijdragen aan bodemdaling. Zo speelt de winning van gas, olie, zout en drooglegging van polders een sterke rol op de bodemdaling in Nederland, maar dan meer op een lokaal schaalniveau (TNO, 2020).

Een goed voorbeeld van inpoldering is Flevoland. Uit een onderzoek van Fokker, Gunnink, Koster en Lange (2019) blijkt dat Flevoland na de inpoldering in 1986 één tot twee meter is gedaald. De daling is het gevolg van krimpen van de klei- en veenlagen, en van de oxidatie van veen. Door verlaging van de grondwaterstand verdwijnt het grondwater uit de veen- en kleibodems waardoor de lagen compacter worden. Het organische materiaal dat in veen aanwezig is, oxideert en verdwijnt. Veenoxidatie draagt in belangrijke mate bij tot de bodemdaling (Van Asselen et al., 2018).

Naast de menselijke activiteiten heeft klimaatverandering invloed op de bodemdaling. Klimaatverandering kan namelijk de fysische, chemische en biologische eigenschappen van de bodem beïnvloeden. De effecten van klimaatverandering hebben een directe en indirecte reactie op de bodem. Indirecte reactie is, zoals hierboven geschreven, de menselijke activiteiten. De directe reactie van klimaatverandering zijn verschijnselen van temperatuurstijging en veranderende neerslagpatronen, zoals de zware regenval in juli 2021 in West-Europa (Verzandvoort-van Dijck & Kuikman, 2009).

Als gevolg van de veranderende weersomstandigheden kan droogte leiden tot lage grondwaterstanden in veenbodems. Naast het feit dat een lage grondwaterstand leidt tot bodemdaling, heeft het ook nog eens een negatief effect op het klimaat zelf. Bij een lage grondwaterstand droogt het veen uit en neemt de uitstoot van CO₂ sterk toe (Van Asselen et al., 2018). Hierdoor stijgt de temperatuur van de aarde, en de temperatuurstijging leidt dus tot verandering in het klimaat. Bodemdaling door klimaatverandering is dus als het ware een cyclus die zich herhaalt.

1.3 De bodem

Uit voorgaande paragrafen blijkt dat bodemdaling voornamelijk in klei- en veenbodems voorkomt in Nederland. In deze paragraaf wordt eerst de bodem uitgebreid behandeld, daarna worden de twee bodems van veen en klei behandeld.

De bodem is één van de fundamentele componenten voor de ondersteuning van het leven op aarde en biedt ons vele diensten. We wonen erop, we slaan er water in op, we eten ervan, we halen er brandstoffen uit en onze spoorinfrastructuur ligt er bovenop. In Nederland liggen diverse afzettingen aan het aardoppervlak, zoals veen, klei of zand. De diversiteit aan bodems is het gevolg van bodemvormende processen die bepaald worden door vijf factoren. Deze zijn moedermateriaal, topografie, klimaat, biologische activiteit en tijd (Jongmans & Van den Berg, 2013).

De bodem is de bovenste laag van de aardkorst die onder invloed van chemische, fysische, biologische en antropogene processen ontstaat. In de loop van de tijd ontstaat een verticale opeenvolging van bodemhorizonten in het geologische uitgangsmateriaal, die het bodemprofiel vormt. Welke bodemtype ontstaat wordt bepaald door het moedermateriaal. Aan de hand van bodemvormende processen kan voorspeld worden welke bodems en bodemkenmerken in het Nederlandse landschap verwacht kunnen worden.

Ook kan er met die kennis voorspeld worden wat de eigenschappen en kwaliteiten van die bodems zullen zijn. De bodems in Nederland zijn gekoppeld aan verschillende soorten landschappen, waaronder veen- en kleilandschappen. Bodemdaling komt voornamelijk voor in deze twee landschappen.

Verschil bodem en grond

Vaak wordt bodem en grond met elkaar verward of heeft men een verkeerd beeld bij de termen. Grond is het complex van vaste bodembestanddelen aan het aardoppervlak. De vaste bestanddelen zijn voornamelijk zand-, löss-, leem- en kleideeltjes en organische stof. De bodem is de bovenste laag van de aardkorst die onder invloed van chemische, fysische, biologische en antropogene processen ontstaat.

Grondsoorten in Nederland

De indeling van grondsoorten wordt bepaald door de korrelgrootteverdeling van lutum-, klei-, silt-, en zandgehalte. De grootte van deze deeltjes zijn maximaal twee millimeter. Deeltjes groter dan twee millimeter worden grind genoemd. De grootte van de deeltjes wordt bepaald door de diameter van de korrels (Remmelink et al., 2014). De meeste korrels zijn niet met het blote oog te zien. In Tabel 1 is een overzicht te zien van de grootte van de korrels.

Tabel 1 Onderverdeling grootte van de korrels

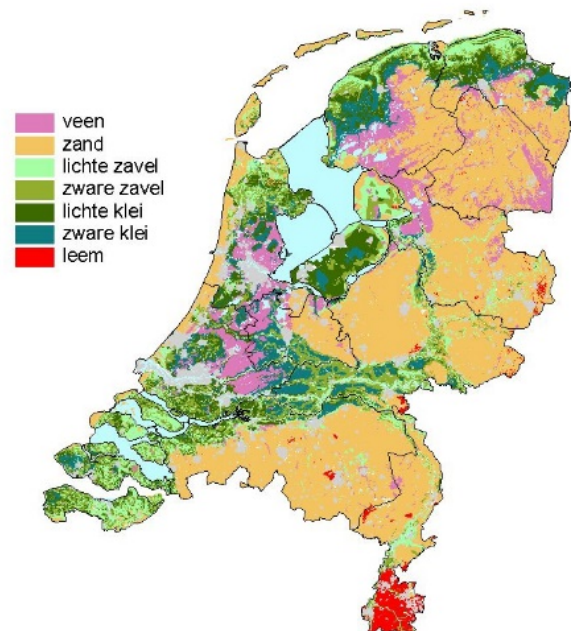
Korrel	Grootte
Zand	50 – 2000 micrometer
Silt	2 – 50 micrometer
Leem	0 – 50 micrometer
Lutum/klei	< 2 micrometer

Nederland heeft vier verschillende grondsoorten. Deze zijn de veen-, zand-, leem- en kleigronden. Uit de grondsoortenkaarten Nederland van Alterra Wageningen UR (2006, Figuur 5) is af te lezen waar deze grondsoorten in Nederland voorkomen. De grondsoorten zijn onder te verdelen in verschillende typen op basis van eigenschappen en ontstaanswijzen. Het landgebruik wordt veelal bepaald door de grondsoorten.

Kleigronden

Om te spreken van kleigronden moet de grond minimaal 8 procent lutum bevatten. Deze gronden zijn de bron van veel van de chemische en fysische eigenschappen van de bodem. De klei zelf is een soort fijnkorrelig natuurlijk bodemmateriaal dat uit zand en lutum bestaat. De deeltjes zijn kleiner dan 2 micrometer. Kleigronden houden water en voedingsstoffen goed vast (Dixon, 1990). Het hoge lutumgehalte in de kleigronden zorgt voor een hogere dichtheid van deze gronden.

Grondsoortenkaart Nederland



ALTERRA
RESEARCH INSTITUUT VOOR DE GROENE RUIMTE

Figuur 5 Grondsoortenkaart Nederland (Alterra Wageningen UR, 2006).

Veengronden

Veengronden bestaan uit 40 procent of meer organische materialen in de bovenste 80 centimeter van de bodem (Steur et al., 1991). De organische materialen zijn afkomstig uit afgestorven resten van planten, dus niet uit minerale deeltjes. De organische deeltjes zijn de in loop der eeuwen ontwikkeld door de ophoping van de plantenresten (Khan Towhid Osman, 2019). Na verloop van tijd kan veen inklinken, waardoor bodemdaling veroorzaakt kan worden (Buijs, 2016). Veen bestaat voor een groot deel uit plantenresten die niet geheel zijn verteerd. Op het moment dat de waterpeil daalt, dringt zuurstof door in de veengronden. Door de aanwezigheid van zuurstof in de grond verteren de plantenresten. Daardoor ontstaat inklinking van veen (Buijs, 2016).

Leemgronden

Leem is een grondsoort dat uit klei, zand en silt bestaat en het heeft relatief gelijke gewicht. Leem valt makkelijk uit elkaar als het wordt samengedrukt (Cornell University, 2007).

Zandgronden

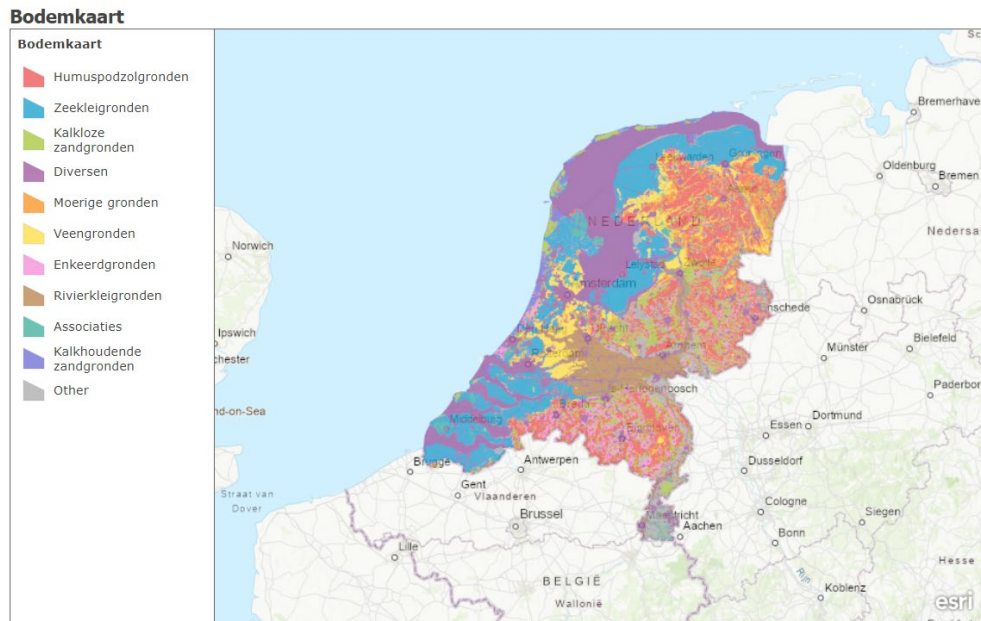
Het sediment zand zelf is in tegenstellig tot de andere korrels wel met het blote oog te zien en heeft een grootte tussen de 50 en 2000 micrometer. Een zandgrond bevat tot acht procent lutum (NutriNorm, z.d.). Daarnaast beschikken deze gronden over leem dat tussen de 0 en 50 micrometer ligt.

Systeem van bodemclassificatie voor Nederland

Bodemclassificatie is een systeem in de bodemkunde dat zich bezighoudt met het ordenen van de bodems op basis van de eigenschappen. De ordening van de bodems heeft als uiteindelijke doel om legenda-eenheden te maken voor bodemkaarten. In de bodemkaart van Esri Nederland (2018, Figuur 6) zijn de legenda-eenheden af te lezen van de kaart. Tevens toont deze kaart de typen bodems van Nederland.

In 1966 is met de publicatie van “Systeem van bodemclassificatie voor Nederland” van De Bakker en Schelling het huidige bodemclassificatiesysteem vastgelegd en in gebruik genomen. In het huidige bodemclassificatiesysteem van Nederland wordt de bodemclassificatie zoveel mogelijk gebaseerd op meetbare en zichtbare bodemeigenschappen (Jongmans & Van den Berg, 2013).

Het systeem is ingedeeld in vier niveaus: orden, suborden, groepen en de subgroepen. De orden bevatten informatie over de type bodems in Nederland. Gezien de bodems betrekking hebben in dit onderzoek, wordt alleen een beknopt beschrijving gegeven over de orden. Voor een complete beschrijving van de vier niveaus wordt verwezen naar Jongmans en Van den Berg (2013) of De Bakker, Schelling, Brus en Van Wallenburg (1989).



Figuur 6 Bodemkaart Nederland (Esri Nederland, 2018).

Podzolbodem

De podzolbodems zijn vooral te vinden in het zandlandschap en zijn niet erg vruchtbaar. Door ontwatering ten behoeve van de landbouw en veranderingen in het infrastructuur is de grondwaterstand verlaagd (Jongmans & Van den Berg, 2013).

Vaagbodem

Vaagbodems zijn kenmerkende bodems van het duinlandschap en worden vaag genoemd omdat nauwelijks een spoor van bodemvorming te zien is. Door het ontbreken van plantengroei en doordat bodemvormende processen nog niet de tijd hebben gehad, is het moedermateriaal zand onveranderd. Het moedermateriaal zand is kalkloos en bevat geen klei.

Lössbodem

Lössbodems zijn kenmerkend voor het heuvellandschap en komen voornamelijk voor in de luwte van Zuid-Limburg. Lössdeeltjes zijn fijne leemdeeltjes die lichtelijk groter zijn dan kleideeltjes, maar veel kleiner dan zanddeeltjes. Löss bevat kleimineralen en is organisch rijk, daardoor zijn deze bodems vruchtbaar (Geologie van Nederland, z.d.-a).

Veenbodem

Veenbodems zijn kenmerkende bodems van het veenlandschap en het zijn de slapste bodems. Veen wordt gevormd door de ophoping van afgestorven plantenmateriaal. Op plekken waar planten kunnen groeien kan veenvorming plaatsvinden wanneer de productie van organisch materiaal de afbraak van het plantenmateriaal overstijgt (Jongmans & Van den Berg, 2013). In veenbodems zijn onverteerde plantenresten te vinden, maar ook zaden, wortels, bladeren en takken. De grondwaterstand in veenbodems is van nature hoog en wordt op veel plekken verlaagd. Het veen droogt uit, klinkt in en verteert.

Rivierkleibodem

Rivierkleibodems zijn kenmerkende bodems van het rivierkleilandschap. Deze bodems ontstaan nadat een rivier overstroomt en kleideeltjes achterlaat in de uiterwaarden. De overstromingen zijn het gevolg van hevige regenval of als de sneeuw smelt in het voorjaar in

de Alpen. De kleideeltjes of kleimineralen ontstaan na erosie van gesteenten in berggebieden. De bodemontwikkeling in rivierkleibodems is niet zo eenvoudig, want bij een volgende overstroming raken de kleideeltjes bedekt met een nieuw kleilaag. Daarnaast is rivierklei compact en laat weinig lucht, water en plantenorganismen binnen (Geologie van Nederland, z.d.-b).

Zeekleibodem

Zeekleibodems zijn kenmerkende bodems van het zeekleilandschap. De bodem bestaat uit kleine en lichte slibdeeltjes die met rivierwater meekomen uit de bergen. De deeltjes zijn kleiner dan de deeltjes die bezinken in de uiterwaarden waaruit rivierkleideeltjes ontstaan. De lichtere slibdeeltjes bezinken na de uitmonding van de rivier in de zee (Geologie van Nederland, z.d.-c).

1.4 Spoorligging

Oneffenheden in de spoorgeometrie zorgen voor grotere belasting van het spoor. Deze oneffenheden worden mogelijk veroorzaakt door bodemdaling.

De spoorgeometrie is de geometrische ligging van het spoorframe in het drie dimensionale vlak. Het samenstel van spoorstaven, dwarsligger, bevestiging of bevestiging op een kunstwerk wordt het spoorframe genoemd. Een slechte spoorligging kan treinschokken veroorzaken die het comfort van de reizigers beïnvloeden. Om de gebreken in de spoorligging te herstellen zijn reparaties nodig van stopmachines. In Figuur 7 is voorbeeld te zien van een stopmachine die door Strukton Rail wordt gebruikt om de spoorstaven terug goed te zetten in het ballastbed.



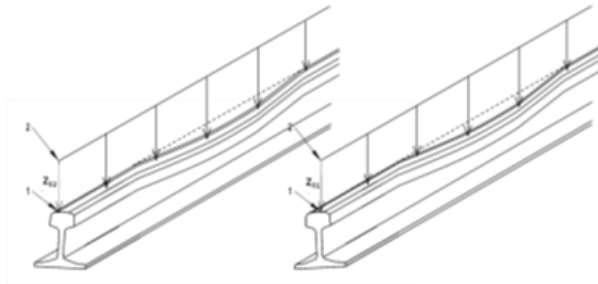
Figuur 7 Herstelmachine Unimat 9 van Strukton Rail

Parameters voor de spoorgeometrie

Voor de spoorgeometrie zijn de parameters hoogte, schift, verkantingsverschil (scheluwte) en spoorwijdte relevant. Voor zowel de hoogte als voor de schift geldt dat deze vanuit het hart van het spoor wordt gemeten. De afwijkingen van het spoor zijn conform NEN-EN 13848-1. NEN-EN 13848-1 geeft definities voor de belangrijkste spoorgeometrieparameters en specificeert de analyse methode (NEN, 2019). De individuele parameters worden door de Strukton Track Scan gemeten, maar ook door de Eurailscout.

Hoogte

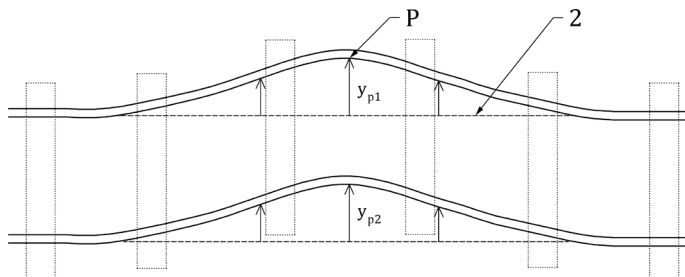
Hoogteparameter is het verschil van de verticale ligging van de hartlijn van het spoor (NEN, 2019).



Figuur 8 Definitie hoogte (Bron: NEN, 2019).

Schift

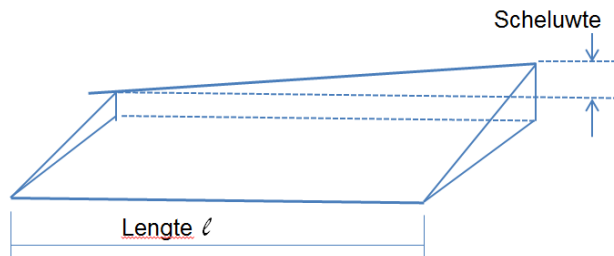
Schift is de afwijking van de horizontale ligging van de hartlijn van het spoor (NEN, 2019).



Figuur 9 Definitie schift (Bron: NEN, 2019).

Scheluwte

Scheluwte is het niet meer in een plat vlak liggen van een spoor, doordat de hoogte van de ene spoorstaaf sneller verandert dan de hoogte van de andere spoorstaaf (NEN, 2019).



Figuur 10 Definitie scheluwte (Bron: NEN, 2019).

Om aan een veilige en betrouwbare spoorinfrastructuur bij te dragen heeft Eurailscout in opdracht van ProRail in de loop der jaren in de contractgebieden van Strukton Rail metingen gedaan naar de spoorligging. De metingen worden na het analyseren verwerkt en visueel zichtbaar gemaakt in een GIS-service genaamd 'Stopplan¹' op ArcGIS Enterprise. In de GIS-service kan een monteur op de kaart zien waar de afwijking in de spoorligging is geconstateerd en wat de prioriteit van de melding is, zie Figuur 11. De prioriteit is afhankelijk van de degeneratie snelheid en de ernst van de huidige waarde. De ernst wordt bepaald door vooraf vastgestelde grenswaarden in een klassenindeling. In de GIS-service kan een specialist en een monteur zien waar er is gemeten, wat de waardes van de parameters zijn en wat de prioriteit is.

¹ Bron afkomstig van het intranet (niet publiekelijk toegankelijk) van Strukton Rail.



Figuur 11 Voorbeeld weergaven van de gemeten gebreken in de spoorgeometrie door Strukton Rail in 2019

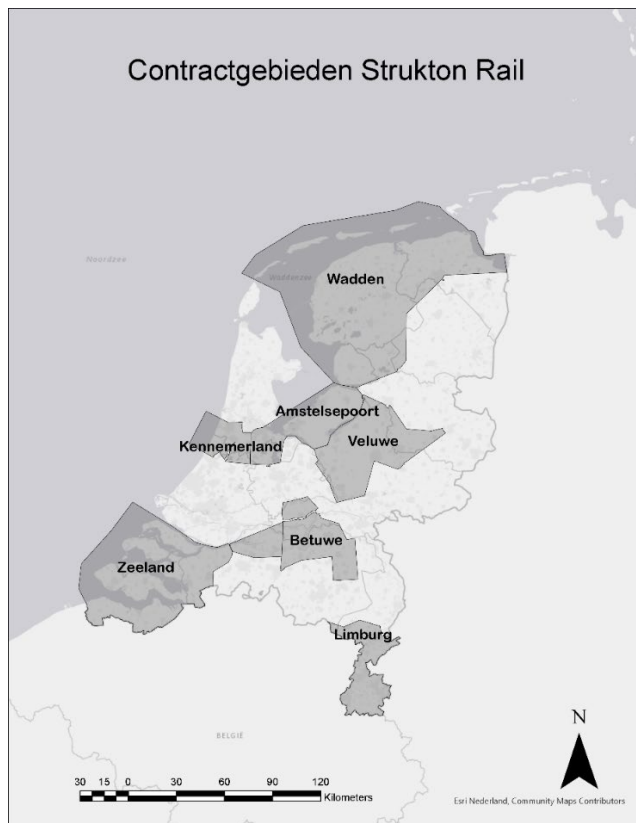
Strukton Rail heeft in zijn eigen contractgebieden in 2019 in totaal 2.299 gebreken gemeten. Van de 2.299 gebreken was 599 gebreken een afwijking van de horizontale ligging van de hartlijn van het spoor, dat ook wel schift wordt genoemd. Scheluwte aan de spoorligging was verantwoordelijk voor 308 gebreken, en 1.392 gebreken zijn gemeten aan de hoogte van de spoorligging. In totaal zijn er 733 reparaties uitgevoerd.

1.5 Knowledge gap

De metingen die worden uitgevoerd vertellen alleen wat de afwijkingen zijn in de spoorgeometrie. Er kunnen verschillende oorzaken zijn die de spoorligging kunnen beïnvloeden, zoals baanbelasting, kunstwerken, duikers en overwegen. Het is echter onduidelijk en niet onderzocht of spoorliggingsproblemen ook door bodemdaling veroorzaakt kunnen worden. Tot op heden worden de metingen geanalyseerd, verwerkt en gevisualiseerd in het stopplan. Daarna wordt de benodigde reparatie verricht aan het spoor. Na de reparaties wordt er vervolgens niets meer gedaan met het stopplan en daar ontstaat een knowledge gap, omdat de precieze oorzaak niet bekend is van de afwijking in de spoorligging. Kennis over verband tussen de spoorliggingsproblemen en bodemdaling zou ervoor kunnen zorgen dat de problemen eerder kunnen worden aangepakt zodat er minder overlast wordt veroorzaakt en de kosten lager zijn.

1.6 Afbakening

In dit onderzoek wordt er uitsluitend gekeken naar sporen waar geen objecten onder liggen. Objecten zoals kunstwerken, duikers en overwegen worden uitgesloten in dit onderzoek. Deze kunnen namelijk een vertekend beeld geven van het onderzoek, dat niets te maken heeft met de type bodem en de bodemdaling. Daarnaast focust dit onderzoek zich alleen op de gebreken aan de spoorligging die zijn gemeten in de contractgebieden van Strukton Rail, in Figuur 12 is een overzichtskaart te zien van de contractgebieden. Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat bodemdaling voornamelijk in klei- en veengronden voorkomt. Daardoor wordt er naar verbanden gezocht in deze twee type gronden en spoorligging gebreken. De andere typen gronden vallen daardoor buiten dit onderzoek.



Figuur 12 Contractgebieden Strukton Rail

1.7 Vraagstelling

In aansluiting op bovenstaande is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd: *'In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?'*

Om deze hoofdvraag te beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. *In welke mate is er sprake van bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail?*
2. *Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?*
3. *Is er een statistisch verband tussen plekken met spoorligging-problemen en bodemdaling?*

1.8 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om te achterhalen of er een verband is tussen de spoorliggingsproblemen en bodemdaling. Het onderzoek richt zich op de spoorliggingsproblemen die door Eurailscout zijn gemeten in de klei- en veengronden in de contractgebieden van Strukton Rail. Uit het onderzoek moet naar voren komen of er een verband is tussen deze twee kwesties. Indien er een verband is kan door het bedrijf veel eerder gehandeld worden om de (toekomstige) problemen aan te pakken. Indien het blijkt dat er geen verband is, dan is de theorie omtrent dit onderwerp middels dit onderzoek ontkracht.

1.9 Leeswijzer

In deze inleiding is ingegaan op de aanleiding van het onderzoek met de bijbehorende literatuur en de doelstelling van dit onderzoek. In het eerstvolgende hoofdstuk wordt de methodologie van het onderzoek besproken. Daarnaast komt in hoofdstuk 2 ook de planning en competenties aan bod. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van dit onderzoek per deelvraag besproken. In hoofdstuk 4 wordt de discussie behandeld en in hoofdstuk 5 en worden de conclusies getrokken en worden er aanbevelingen gedaan.

2. Aanpak

In dit hoofdstuk wordt de aanpak van het onderzoek beschreven, zodat duidelijk is hoe het antwoord op de onderzoeksvraag wordt verkregen. In de eerste paragraaf wordt er ingegaan op het onderzoeksoptzet. Daarna wordt er per deelvraag beschreven welke onderzoeksmethoden en verzamelinstrumenten gebruikt worden.

2.1 Onderzoeksmethode

Om de hoofdvraag *'In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?'*, te beantwoorden, is deze opgedeeld in drie deelvragen. Voor dit onderzoek is een kwantitatief en kwalitatief onderzoek uitgevoerd om antwoord te geven op de hoofdvraag. Kwantitatief om naar verbanden te zoeken, en kwalitatief om inzicht te krijgen in de gemeten gebreken. Daarnaast zijn er door middel van desk- en fieldresearch data verzameld en geanalyseerd. In de komende paragrafen wordt de aanpak per deelvraag uitgebreid behandeld.

2.2 Onderzoeksmethode per deelvraag

Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail?

Deze deelvraag is van belang om een inzicht te krijgen waar de bodemdalingen plaatsvinden in Nederland. De onderzoeker heeft middels een deskresearch bestaande gegevens over bodemdaling verzameld. Met de bestaande gegevens is een secundaire analyse uitgevoerd om zinvolle informatie uit de gegevens te halen. Een secundaire analyse is een onderzoek dat door anderen is verricht (Fischer, 2019). In dit geval zijn de metingen nabij bodemdaling het uitgangspunt voor dit onderzoek.

Bodemdaling wordt gemeten door InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). InSAR is een techniek die met satellietmetingen vervormingspatronen van het aardoppervlak in kaart brengt (SkyGeo, z.d.). De satellieten nemen in een tijdserie van zes dagen beelden van het aardoppervlak. Vervolgens worden deze metingen verwerkt door SkyGeo en gepubliceerd op Bodemdalingskaart.nl (<https://bodemdalingskaart.nl/nl/>).

Om de validiteit van het onderzoek te waarborgen moet de bestaande gegevens aan de volgende criteria voldoen:

- De bestaande ruimtelijke gegevens moeten vector- of rastergegevens zijn. Vector- en rastergegevens zijn de twee voornaamste ruimtelijke gegevens in GIS. Vectorgegevens zijn punten, lijnen en vlakken. Rastergegevens zijn opgebouwd uit pixels. Deze twee datatypen kunnen in GIS-software zoals ArcGIS Pro ingevoerd worden voor verdere bewerking en analyse.
- De inhoud van de data moet dekkend zijn voor de contractgebieden van Strukton Rail. Om een nauwkeurige data-analyse uit te voeren moet er verschil kunnen worden gemeten met diverse locaties in Nederland.

Daarnaast zijn de verzamelde data in een willekeurige volgorde geanalyseerd om de validiteit te waarborgen. Om toevallige fouten te voorkomen en de betrouwbaarheid van het onderzoek te waarborgen, is de software ArcGIS Pro gebruikt. ArcGIS Pro biedt een uitgebreide keuze van tools die gebruikt kunnen worden om ruimtelijke analyses uit te voeren

of om de GIS-gegevens te beheren.

Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?

Deze tweede deelvraag is opgesteld om inzicht te krijgen over de vastgelegde metingen van de spoorgeometrie. Middels deze vraag zijn de type gebreken in kaart gebracht die alleen relevant zijn voor dit onderzoek. Voor deze deelvraag is zowel een kwantitatief als een kwalitatief methode gebruikt.

Allereerst zijn bestaande numerieke gegevens verzameld door een deskresearch uit te voeren in de databases. Het stopplan zoals is geschreven in paragraaf 1.4 is een GIS-service waarin de gebreken zijn vastgelegd. Uit het stopplan zijn de bestaande numerieke gegevens opgehaald voor data processing. Data processing is het proces van data verzamelen en prepareren om tot zinvolle informatie te komen. Om tot zinvolle informatie te komen is het stopplan gecombineerd met de dataset van deelvraag één en met de volgende twee datasets:

- Geleidingssysteem: In deze dataset zijn de sporen van Nederland vastgelegd (Prorail, 2020a).
- Kunstwerken gebouwen ProRail: Deze dataset geeft informatie weer over de type kunstwerken die op of onder een spoor bevinden (Prorail, 2020b).

Met deze bestaande gegevens is een secundaire analyse uitgevoerd. In dit geval zijn de metingen van de meettrein het uitgangspunt voor een secundaire analyse. De gegevens van de metingen zijn statistisch bewerkt om antwoord te geven op de tweede deelvraag. Om de validiteit van het onderzoek te waarborgen moet de bestaande gegevens aan de volgende criteria voldoen:

- Voldoende data. De dataset moet minimaal over 1000 records beschikken.
- De metingen moeten door Strukton Rail of Eurailscout vastgelegd zijn.
- Om de nauwkeurigheid van de metingen te waarborgen moeten de metingen waargenomen zijn door de meettreinen. Het is dus belangrijk dat de datasets beschrijven hoe de metingen zijn verricht.
- De gemeten gebreken zijn identiek. Een objectnummer moet dus uniek zijn en kan niet twee keer terugkomen in de dataset.
- De metingen mogen niet ouder dan tien jaar zijn.

Voor het verwerken van de bestaande gegevens is gebruikt gemaakt zoals bij deelvraag één van de software ArcGIS Pro. Om de betrouwbaarheid te waarborgen zijn alleen de spoorgebreken waarvan er geen kunstwerken, overwegen en wissels onder of op het spoor liggen gebruikt voor de data-analyse.

Daarnaast is een semigestructureerde interview afgenomen bij de vakspecialisten om de interne validiteit te waarborgen. De vakspecialisten zijn geselecteerd op voorwaarde dat zij binnen Strukton Rail werkzaam zijn, en over de kennis beschikken over de spoorligging. De geselecteerde specialisten zijn:

1. Tom Wessels – Vakspecialist over de spoorbaan en procesbewaking.
2. Erik-Jan Roll – Rail maintenance analist. Tevens de persoon die het stopplan maakt.

Ten behoeve van de validiteit is het interviewprotocol opgesteld dat te vinden is in Bijlage I Interviewprotocol m.b.t. het stopplan. Om de betrouwbaarheid van de interviews te

waarborgen, zijn de interviews transcript, uitgewerkt en beschikbaar gesteld voor derden. Daarnaast is er zoals bij deelvraag één een logboek bij gehouden van alle stappen om de betrouwbaarheid te waarborgen.

Deelvraag 3: Is er een statistisch verband tussen plekken met spoorligging-problemen en bodemdaling?

De laatste deelvraag is beantwoord door een deskresearch van bestaande gegevens uit deelvraag één en twee. Deze gegevens zijn geanalyseerd of er een statistisch verband is tussen de gebreken in de spoorligging en de bodemdaling. Deze analyse is kwantitatief en kwalitatief uitgevoerd. Kwantitatief door de gegevens in een software zoals SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) of ArcGIS Pro.

SPSS is een statistische software die gebruikt kan worden om bruikbare inzichten te halen uit de gegevens door het uitvoeren van een analyse (IBM, z.d.). ArcGIS Pro kan gebruikt worden om een ruimtelijke autocorrelatie analyse uit te voeren. De ruimtelijke autocorrelatie is een tool die in de software is gebouwd. Middels deze tool kan op basis van kenmerklocaties (bodemdaling en spoorligging gebreken) en attribuutwaarden de ruimtelijke correlatie gemeten worden (Esri, z.d.).

Middels de analyse is op een kwalitatieve methode onderzocht of er verbanden zijn in de spoorligging gebreken en bodemdaling om de deelvraag te beantwoorden. Om de validiteit te waarborgen zijn de spoorligging gebreken en de bodemdaling van klei- en veengronden in kaart gebracht. Om de betrouwbaarheid te waarborgen, is er gebruik gemaakt van software, zoals ArcGIS Pro of SPSS om toevallige fouten te voorkomen.

3. Resultaten

In dit hoofdstuk worden de verkregen resultaten beschreven en toegelicht. Dit wordt gedaan per deelvraag

3.1 Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling

Voor dit onderzoek is de bodemdalingsdata van de bodemdalingskaart 2.0 gebruikt. Deze datasets zijn de meest complete datasets die beschikbaar zijn voor heel Nederland. De metingen van de bodemdaling dateren tussen januari 2015 en juni 2020. In totaal zijn er 1.467 opnames gemaakt met de radarsatellieten, en in totaal zijn er 165 miljoen meetpunten in de datasets.

Deze informatie wordt door het Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG) beschikbaar gesteld met de medewerking van universiteiten, geodetische bedrijven en kenniscentra. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van de data. De bodemdalingskaart is opgebouwd uit zes kaartlagen. De kaartlagen zijn het resultaat van de satellieten die vanuit verschillende posities naar Nederland kijken. Deze kaartlagen zijn verdeeld over drie stroken West, Oost en Zuid (Bodemdalingskaart 2.0, z.d.). In Bijlage II Data verzamelen deelvraag 1 is te zien hoe en welke data is verzameld voor deze deelvraag.

Om de hoeveelheid data te verminderen zijn de datasets eerst verwerkt en gereed gemaakt voor gebruik. Het is belangrijk om te achterhalen hoe groot de bodemdaling nabij het spoor is. In Bijlage III Data prepareren deelvraag 1 en Bijlage IV Data analyseren deelvraag 1 is te zien hoe de data is verwerkt, geprepareerd en geanalyseerd. Om de consistentie te houden in het onderzoek is er specifiek gekeken naar de meetpunten die binnen twee meter van het spoor zijn waargenomen door de satellieten. Alleen bij de analyse van de meetpunten die niet in de buurt van kunstwerken, duikers en overwegen zijn waargenomen, is 50 meter aangehouden. Dit is gedaan omdat het grond regelmatig wordt versterkt rondom kunstwerken.

Het antwoord op deze deelvraag is verkregen door het uitvoeren van drie analyses. Deze zijn:

1. De gemiddelde bodemdaling per jaar van de meetpunten die zijn waargenomen binnen twee meter van het spoor in de contractgebieden van Strukton Rail.
2. De gemiddelde bodemdaling per jaar van de meetpunten die zijn waargenomen binnen twee meter van het spoor in de klei- en veengronden in de contractgebieden van Strukton Rail.
3. De gemiddelde bodemdaling per jaar met uitzondering van de meetpunten die zijn waargenomen door de satellieten binnen 50 meter van een kunstwerk, duiker of een overweg. Ook deze analyse is uitgevoerd in de contractgebieden van Strukton Rail.

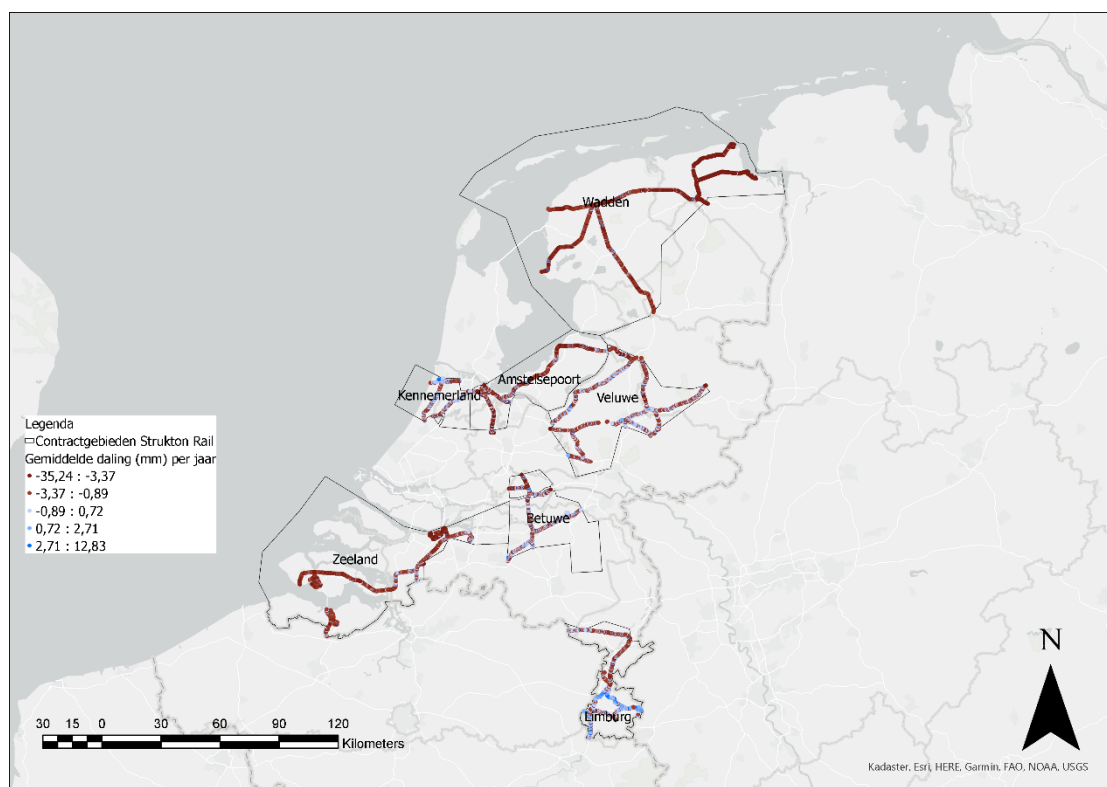
Op basis van deze drie analyses is het resultaat verkregen in welke mate er sprake is van bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail. De analyses zijn uitgevoerd in ArcGIS Pro.

Uit de eerste analyse is naar voor gekomen dat in het contractgebied Wadden de bodemdaling per jaar het hoogste is met een daling van -4,34 millimeter. Het contractgebied Limburg daalt het minste ten op zichte van de andere contractgebieden.

In Tabel 3 is het overzicht te zien van de bodemdaling per contractgebied. In Figuur 13 is een overzichtskaart te zien van de bodemdaling.

Tabel 2 De gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar van alle meetpunten die zijn waargenomen binnen 2 meter van het spoor

PGO-contractgebied	Gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar
Amstelsepoort	-2,97
Betuwe	-1,10
Kennemerland	-1,09
Limburg	--0,58
Veluwe	-1,48
Wadden	-4,34
Zeeland	-2,40
Totaal	-1,83



Figuur 13 Overzichtskaart gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar van alle meetpunten binenn 2 meter van het spoor in de contractgebieden van Strukton Rail

De tweede analyse is uitgevoerd met informatie uit de datasets van grondsoorten, bodemdalingsdata en spoorwegen. In deze analyse is de gemiddelde bodemdaling berekend. In Bijlage III Data prepareren deelvraag 1 en Bijlage IV Data analyseren deelvraag 1 is te zien hoe de data is verwerkt, geprepareerd en geanalyseerd.

Uit de tweede analyse blijkt dat in het contractgebied Wadden de lichte zavel gronden het snelste dalen met -6,82 millimeter per jaar. In Tabel 4 is het overzicht te zien van de bodemdaling in de verschillende typen gronden per contractgebied. In Tabel 5 is een overzicht te zien van de oppervlakte van de typen gronden. Deze gronden bevinden zich

binnen twee meter van het spoor, en geeft dus niet de totale oppervlakte weer over het hele contractgebied.

Tabel 3 De gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar binnen 2 meter van het spoor op de klei- en veengronden

PGO-contractgebied	Lichte klei	Lichte zavel	Veen	Zware klei	Zware zavel	Eindtotaal
Amstelsepoort	-2,44	-2,41	-3,03	-3,46	-4,87	-3,24
Betuwe	-3,95	-0,92	-0,94	-1,90	-1,30	-1,80
Kennemerland	-1,08	-1,18	-1,22	-1,57	-1,20	-1,25
Limburg	-0,04	-1,08		-2,90	-0,73	-1,19
Veluwe	-3,02	-2,30	-4,37	-3,24	-3,00	-3,18
Wadden	-4,83	-6,82	-3,22	-4,44	-5,81	-5,02
Zeeland	-2,86	-2,61	-1,96	-3,66	-2,88	-2,79
Eindtotaal	-2,60	-2,47	-2,46	-3,02	-2,83	-2,68

Tabel 4 De oppervlakte in m² van de gronden die zich binnen 2 meter van het spoor bevinden

PGO-contractgebied	Lichte klei (m ²)	Lichte zavel (m ²)	Veen (m ²)	Zware klei (m ²)	Zware zavel (m ²)	Eindtotaal (m ²)
Amstelsepoort	263209,72	49321,88	427133,71	146043,72	57763,41	943472,44
Betuwe	1610,91	20743,48	1144,25	28223,95	71843,07	123565,67
Kennemerland	126166,47	32106,74	32503,33	4364,26	17133,22	212274,02
Limburg	853,63	131986,91		1150,60	64050,32	198041,46
Veluwe	5038,61	113827,09	40724,23	37200,27	105551,46	302341,66
Wadden	374822,72	130001,93	118926,69	216493,15	126677,45	966921,95
Zeeland	241144,56	284251,15	6906,16	97516,20	280721,78	910539,84
Eindtotaal (m ²)	1012846,62	762239,18	627338,36	645294,51	808312,56	3856031,22

De derde analyse is uitgevoerd op basis van de informatie uit de datasets van de kunstwerken, duikers en overwegen en de bodemdalingsdata. In deze analyse is de gemiddelde bodemdaling berekend van de meetpunten die zich niet bevinden binnen 50 meter van een kunstwerk, duiker of overweg.

Uit de derde analyse is ook naar voren gekomen dat in het contractgebied Wadden de bodem het snelste daalt met -4,31 millimeter per jaar. In Tabel 6 is het overzicht te zien van de gemiddelde bodemdaling die 50 meter van een kunstwerk, duiker of een overweg plaatsvindt.

Tabel 5 De gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar van alle meetpunten die 50 meter van een kunstwerk, duiker en overweg vandaan zijn waargenomen

PGO-contractgebied	Gemiddelde bodemdaling (mm) per jaar
Amstelsepoort	-3,14
Betuwe	-1,11
Kennemerland	-1,14
Limburg	-0,61
Veluwe	-1,49
Wadden	-4,31
Zeeland	-2,45

3.2 Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken

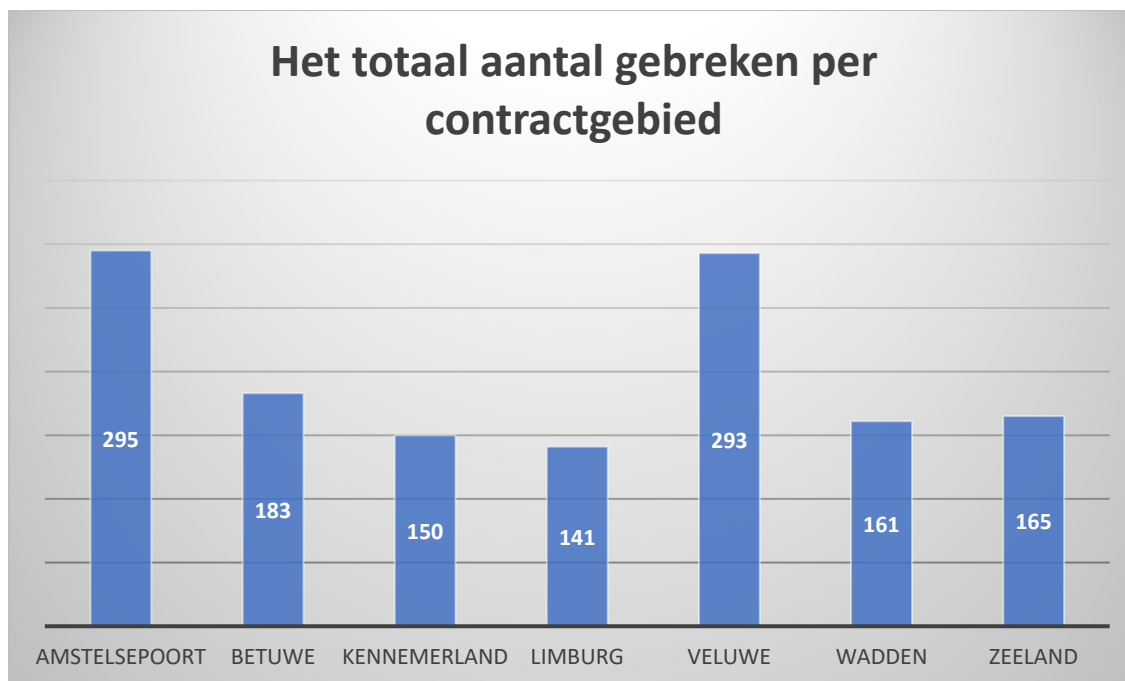
De resultaten van deze deelvraag zijn verkregen door het uitvoeren van een GIS-analyse waarin de data van het stopplan en de kunstwerken zijn gebruikt.

Figuur 14 toont het totaal aantal spoorliggingsproblemen in de contractgebieden van Strukton Rail. In Figuur 15 is een overzicht te zien van de status van de gebreken die verdeeld zijn in prioriteit 1, 2, en 3. De prioriteit is afhankelijk van de gemeten waarde. In Bijlage V data verzamelen en prepareren deelvraag 2 is te zien hoe de data zijn verwerkt en geprepareerd om de resultaten te verkrijgen.

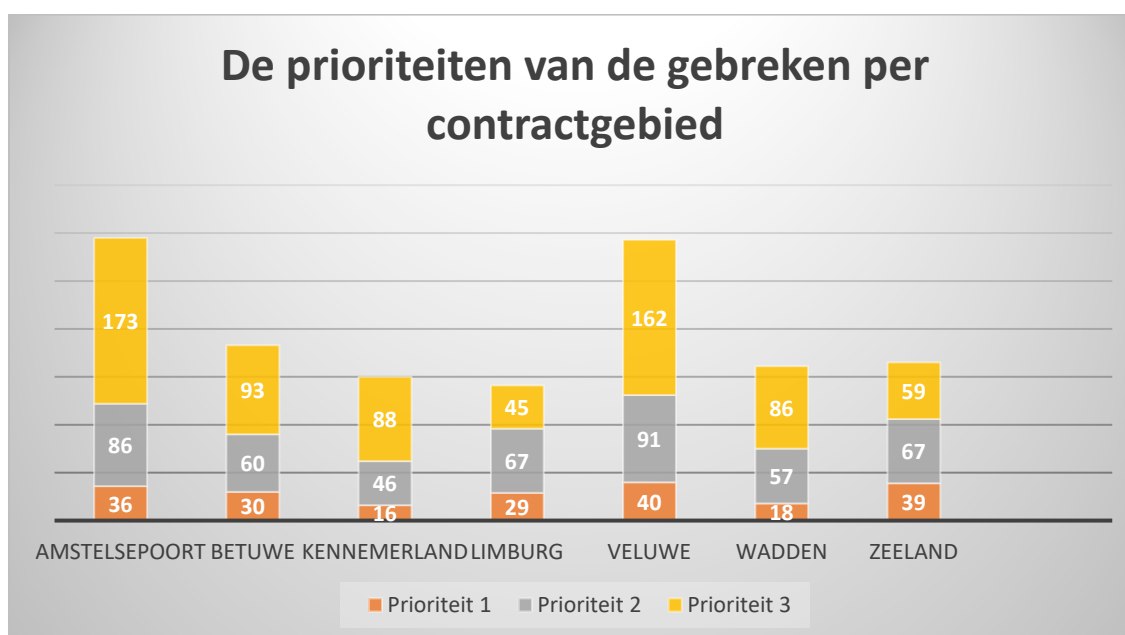
De data die voor deze deelvraag zijn gebruikt komen uit twee databases. De data van het stopplan komen uit de database van Strukton Rail zelf. In deze dataset zijn de metingen over de hele contractgebieden van Strukton Rail te vinden van het jaar 2019 en bevat in totaal 2.299 gemeten gebreken. Voor dit onderzoek zijn de metingen die net buiten de contractgebieden van Strukton Rail vallen met een analyse eruit gehaald. De gebreken in de spoorligging waaronder een object zoals kunstwerken, duikers en overwegen liggen zijn ook met een analyse eruit gehaald. Na de analyse is het totaal aantal gebreken van 2.299 naar 1.388 gedaald.

Uit de data-analyse is het overzicht naar voren gekomen met het aantal gebreken die zijn gemeten per contractgebied. Uit Figuur 14 valt af te leiden dat in het contractgebied Amstelsepoort de meeste spoorliggingsproblemen voorkomen met in totaal 295 gebreken, gevolgd met Veluwe waar in totaal 293 gebreken zijn gemeten. Bij de data-analyse is ook een andere inzicht naar voren gekomen. In Figuur 15 is een overzicht van de prioriteiten van de gebreken te zien. Daaruit blijkt dat het contractgebied Veluwe het hoogste prioriteit 1 gebreken heeft met in totaal 40, gevolgd door Zeeland met 39 prioriteit 1 gebreken. Als derde komt Amstelsepoort met 36 gebreken die een prioriteit 1 hebben.

Oorspronkelijk stond in het vooronderzoek dat voor deze deelvraag interviews worden afgenomen. De interviews zijn uiteindelijk niet afgenomen omdat deze deelvraag compleet is beantwoord met de uitgevoerde analyse, en de interviews zouden geen nieuwe informatie toevoegen aan het onderzoek.



Figuur 14 Het totaal aantal gebreken per contractgebied.



Figuur 15 De prioriteiten van de gebreken per contractgebied

3.3 Deelvraag 3: Is er een statistisch verband met spoorliggingsproblemen en bodemdaling

Om te achterhalen of er een statistisch verband is tussen bodemdaling en de gebreken in de spoorligging is de bodemdaling per prioriteit berekend. Voor deze deelvraag zijn de datasets bodemdalingsdata uit deelvraag 1 en het stopplan uit deelvraag 2 gebruikt. Deze datasets zijn uit de voorgaande analyses al geprepareerd en er is voor deze deelvraag geen uitzonderlijke analyse uitgevoerd om de datasets te filteren. In de Bijlage VII Data analyseren deelvraag 3 en Bijlage VI Data prepareren deelvraag 3 is te zien hoe de data zijn geprepareerd en geanalyseerd.

Het resultaat op deze deelvraag is verkregen door de gemiddelde bodemdaling in een buffer van tien meter om de gemeten spoorliggingsprobleem te berekenen. De meetpunten van de bodemdaling zijn in de buffer bij elkaar opgeteld en daaruit is de gemiddelde bodemdaling per gemeten spoorliggingsprobleem berekend. De prioriteit van de spoorliggingsproblemen zijn afhankelijk van de gemeten waarden, zoals ook beschreven is in paragraaf 1.4. Om te achterhalen of er een verband is in de bodemdaling met de prioriteit van de spoorliggingsprobleem is een data-analyse uitgevoerd in ArcGIS Pro. In deze analyse is per contractgebied de gemiddelde bodemdaling per prioriteit berekend.

In Tabel 7 is het overzicht te zien per contractgebied van de gemiddelde bodemdaling die per prioriteit is waargenomen.

Tabel 6 De gemiddelde bodemdaling (mm per jaar) per prioriteit van de spoorliggingsproblemen

PGO-contractgebied	Prioriteit 1	Prioriteit 2	Prioriteit3	Eindtotaal gemiddelde
<i>Amstelsepoort</i>	-3,83	-3,63	-3,24	-3,57
<i>Betuwe</i>	-1,68	-1,97	-1,89	-1,85
<i>Kennemerland</i>	-2,05	-1,07	-1,06	-1,39
<i>Limburg</i>	-0,83	-0,95	-0,94	-0,91
<i>Veluwe</i>	-1,73	-1,85	-1,70	-1,76
<i>Wadden</i>	-3,16	-4,43	-3,97	-3,85
<i>Zeeland</i>	-2,68	-2,95	-2,92	-2,85

4. Discussie

In dit hoofdstuk worden als eerst de resultaten per deelvraag bediscussieerd. Vervolgens wordt er gereflecteerd op de gekozen aanpak.

Het doel van dit onderzoek is om te achterhalen of er een verband is tussen de spoorliggingsproblemen en de bodemdaling. Het onderzoek is gericht op de spoorliggingsproblemen die door Eurailscout zijn gemeten in de klei- en veengronden in de contractgebieden van Strukton Rail.

4.1 Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling?

Om de betrouwbaarheid van het onderzoek te verhogen zijn er drie verschillende analyses uitgevoerd om de gemiddelde bodemdaling te achterhalen. De analyses zijn uitgevoerd op basis van verschillende factoren om alle toevallige resultaten uit te sluiten. In de eerste analyse zijn alle meetpunten die binnen twee meter van het spoor zijn waargenomen geanalyseerd. In de tweede analyse zijn alle meetpunten die zijn waargenomen op de klei- en veengronden binnen twee meter van het spoor geanalyseerd. In de derde analyse zijn de meetpunten die verder dan 50 meter van een kunstwerk vandaan zijn waargenomen geanalyseerd.

Uit de literatuurstudie komt naar voren dat bodemdaling kenmerkend is in de klei- en veengronden en dat menselijke activiteiten een grote invloed hebben op de bodemdaling. Uit de resultaten van de analyses voor deelvraag 1 komt naar voren dat in het contractgebied Wadden de bodem het snelst daalt.

De menselijke activiteiten, zoals de gaswinning in de provincie Noord-Nederland, zou een grote invloed kunnen hebben op de bodemdaling in Wadden. Daarnaast heeft Wadden een relatief groter aantal vierkante meter van klei- en veengronden ten opzichte van de overige contractgebieden. De grootte van het gebied zou ook een rol kunnen hebben dat de bodem sneller daalt in Wadden dan in de andere contractgebieden.

De resultaten van de analyses zorgen ervoor dat Strukton Rail en soortgelijke spooraannemers een inzicht hebben in de mate van bodemdaling in de onderzochte contractgebieden. Middels deze resultaten kunnen spooraannemers gerichte calculaties maken voor spooronderhoud. Gezien de bodem het snelst daalt in Wadden zouden de spooraannemers ook eerder kunnen anticiperen op verstoringen in de spoorgeometrie op de parameters hoogte, schift en het verkantingsverschil.

Voor het verkrijgen van waardevolle informatie voor deelvraag 1 zijn een deskresearch en secundaire analyses uitgevoerd. Middels de deskresearch is informatie over de bodemdaling verzameld. Middels de secundaire analyses is gemeten wat gemeten kon worden over de mate van de bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail. De lezer moet rekening houden met het feit dat de bodemdalingsdata dateert tussen het jaar 2016 en 2020. Dit onderzoek behandelt niet de bodemdaling die voor het jaar 2016 en na 2020 is gemeten.

De gebruikte software ArcGIS Pro was niet geheel geschikt voor de secundaire analyse. ArcGIS Pro kan in vergelijking met ETL (Extraction, Transformation and Load) programma's big-data niet goed aan. De data had veel sneller geprepareerd kunnen worden in een ETL

software voor de analyses in ArcGIS Pro.

4.2 Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste problemen van spoorligging gebreken?

Uit de resultaten van deelvraag 2 komt naar voren dat de meeste problemen in de spoorligging zijn gemeten in het contractgebied Amstelsepoort. Daarnaast blijkt dat de meeste prioriteit 1 en 2 gebreken die het snelst verholpen moeten worden in het contractgebied Veluwe zijn gemeten.

Uit de literatuurstudie komt naar voren dat Flevoland na de inpoldering in 1986 één tot twee meter is gedaald. Ook blijkt uit de literatuurstudie dat verlaging van de grondwaterstand een grote invloed heeft op de bodemdaling. De verlaging van de grondwaterstand zorgt ervoor dat het grondwater verdwijnt uit de klei- en veenbodems waardoor deze klei- en veenlagen krimpen. Het proces van verlaging van de grondwaterstand in Flevoland zou voor verstoring in de spoorgeometrie kunnen zorgen.

Uit de resultaten valt ook op dat Wadden op plaats vijf van de zeven contractgebieden staat met het aantal spoorliggingsproblemen, ondanks het feit dat de bodem het snelst daalt in Wadden. Het zou kunnen dat er andere oorzaken zijn die voor het hoge aantal spoorliggingsproblemen zorgen in Amstelsepoort. De lezer moet rekening houden met het feit dat dit onderzoek zich richt op de ruimtelijke correlatie tussen te bodemdaling en spoorligging. Dit onderzoek behandelt geen andere oorzaken die mogelijk een rol zouden kunnen hebben in de spoorliggingsproblemen, zoals bijvoorbeeld baanbelasting. Bovendien is er een ander discussiepunt. Er is geen rekening gehouden met de lengte van het spoor. De totale lengte van het spoor kan verschillen per contractgebied. Dat zou van invloed kunnen zijn op het aantal gemeten gebreken. De betrouwbaarheid van het onderzoek had verbeterd kunnen worden door het aantal gebreken per contractgebied te delen met de totale lengte van het spoor.

Voor deze deelvraag zouden aanvankelijk interviews worden afgenomen. Uiteindelijk zijn die niet gedaan, omdat de deelvraag compleet was beantwoord na de secundaire analyse. Toch zou het afnemen van interviews de interne validiteit kunnen verhogen van dit onderzoek. De interviews hadden dan wel anders moeten zijn dan een semigestructureerd interview. Na het verkrijgen van de resultaten uit de secundaire analyse hadden de resultaten voorgelegd kunnen worden aan de specialisten op het terrein van de spoorbaan. Daaruit zouden nieuwe inzichten naar voren kunnen komen.

Voor deze deelvraag is een deskresearch uitgevoerd om bestaande gegevens te verzamelen, omdat de bestaande gegevens direct uit de databases van Strukton Rail komen, was een breder deskresearch niet nodig. Met de bestaande gegevens is vervolgens een secundaire analyse uitgevoerd. Middels de secundaire analyse is gemeten wat er gemeten kon worden om de spoorliggingsproblemen inzichtelijk te maken per contractgebied. De betrouwbaarheid van de gebruikte methode is geborgd door de stappen bij te houden in een logboek en door het gebruiken van gegevens uit de databases van Strukton Rail zelf.

4.3 Deelvraag 3: Is er een statistisch verband met spoorligging-problemen en bodemdaling?

Uit de resultaten komt naar voren dat er geen statistisch verband is tussen de gemiddelde bodemdaling en de ernst van de spoorliggingsproblemen. Uit de resultaten valt het ook op dat de gemiddelde bodemdaling bij de prioriteit 1 gebreken niet hoger is dan bij de prioriteit 2 of 3 gebreken. Daarnaast valt het ook op dat de bodem in Wadden nabij de gemeten gebreken sneller daalt dan de overige contractgebieden. Dit is opvallend omdat in Wadden veel minder gebreken zijn gemeten, maar de bodem nabij de gebreken daalt dus wel sneller. Het is ook opmerkelijk dat de bodem nabij de gemeten gebreken in Veluwe minder snel daalt dan in Betuwe. In Veluwe zijn namelijk 110 meer gebreken gemeten dan in Betuwe.

Een potentieel probleem is dat de statistische berekeningen niet in SPSS zijn uitgevoerd, maar in ArcGIS Pro. In het vooronderzoek was de software SPSS opgenomen voor het maken van statistische berekeningen. Uiteindelijk is in ArcGIS Pro de analyse uitgevoerd om te kijken of er een statistisch verband is. ArcGIS Pro is in vergelijking met SPSS niet een statistische software van oorsprong, en de mogelijkheden voor statistische berekeningen zijn minder. De betrouwbaarheid van het onderzoek had verhoogd kunnen worden door de statistische berekeningen in SPSS te uitvoeren.

Een ander potentieel probleem is dat de gemiddelde bodemdaling binnen een buffer van tien meter om de gemeten spoorliggingsproblemen is berekend. Vervolgens is de gemiddelde bodemdaling per prioriteit vergeleken of er een statistisch verband is. De betrouwbaarheid van het onderzoek had verhoogd kunnen worden door de gemiddelde bodemdaling van meerdere afstanden te berekenen in plaats van alleen tien meter. De resultaten hadden dan over meerdere afstanden met elkaar vergeleken kunnen worden. Daaruit zou dan ook naar voren kunnen komen of de bodem sneller daalt onder het spoor.

5. Conclusie en aanbevelingen

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op volgende de hoofdvraag: *‘In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?’*. Hiervoor is een kwalitatief en kwantitatief onderzoek uitgevoerd naar de bodemdaling en de spoorliggingsproblemen in de contractgebieden van Strukton Rail. Het doel van het onderzoek is om te achterhalen of er een verband is tussen de spoorliggingsproblemen en de bodemdaling.

In dit hoofdstuk worden eerst de conclusies van de onderzoeksvragen behandeld. Daarna worden de aanbevelingen en het vervolgonderzoek behandeld.

5.1 Conclusie

Deelvraag 1: In welke mate is er sprake van bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail?

Uit dit onderzoek is gebleken dat de bodem in de contractgebieden van Strukton Rail daalt met gemiddeld -1,83 millimeter per jaar. Daarnaast is gebleken dat de bodem binnen twee meter van het spoor in het contractgebied Wadden het snelst daalt met -4,34 millimeter per jaar. Uit de resultaten is tevens gebleken dat de bodem in Wadden binnen twee meter van klei- en veengronden en 50 meter van een kunstwerk vandaan sneller daalt ten opzichte van de overige contractgebieden. Hieruit kan opgemaakt worden dat de bodem in het contractgebied Wadden het snelst daalt.

Deelvraag 2: Waar bevinden zich de meeste spoorliggingsproblemen in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?

Om antwoord te geven op deze deelvraag is een kwalitatief en kwantitatief onderzoek uitgevoerd naar de spoorliggingsproblemen die zijn gemeten in de contractgebieden van Strukton Rail. Uit dit onderzoek is gebleken dat de meeste spoorliggingsproblemen zijn gemeten in het contractgebied Amstelsepoort. Uit de resultaten is tevens gebleken dat de meeste spoorliggingsproblemen met prioriteit 1 en 2 zijn gemeten in het contractgebied Veluwe.

Deelvraag 3: Is er een statistisch verband tussen plekken met spoorliggingsproblemen en bodemdaling?

Om antwoord te geven op deze deelvraag is een kwalitatief en kwantitatief onderzoek uitgevoerd om naar een statistisch verband te zoeken tussen plekken met spoorliggingsproblemen en de bodemdaling. Uit dit onderzoek is gebleken dat er geen statistisch verband is tussen de bodemdaling en de spoorliggingsproblemen. Opmerkelijk is dat de bodemdaling geen invloed heeft op de ernst van de spoorliggingsproblemen. De bodemdaling neemt niet toe naarmate de prioriteit toeneemt.

Uit de resultaten is tevens gebleken dat de gemiddelde bodemdaling nabij de gemeten spoorliggingsproblemen hoger is dan de gemiddelde bodemdaling binnen twee meter van het spoor.

In hoeverre is er een ruimtelijke correlatie tussen gebreken in de spoorligging en bodemdaling in de contractgebieden van Strukton Rail Nederland?

Het doel van dit onderzoek is om te achterhalen of er een verband is tussen de spoorliggingsproblemen en bodemdaling in de klei- en veengronden. Het onderzoek dient als een onderbouwing of ontkrachting voor Strukton Rail en soortgelijke organisaties in Nederland.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de bodem nabij de gemeten spoorliggingsproblemen sneller daalt dan de bodem binnen twee meter van het spoor over het contractgebied. Opmerkelijk is dat de bodemdaling geen invloed heeft op de prioriteit van de spoorliggingsproblemen. De prioriteit van de spoorliggingsproblemen neemt niet toe naarmate de bodemdaling toeneemt. Hieruit kan opgemaakt worden dat er geen ruimtelijke correlatie is tussen de gebreken in de spoorligging en de bodemdaling.

5.2 Aanbevelingen

Strukton Rail en soortgelijke organisaties moeten rekening houden bij het analyseren van de gemeten gebreken met de totale spoorlengte die ligt in een contractgebied. Het wordt aangeraden om deze informatie mee te nemen bij het maken van een analyse zodat het aantal gebreken vergeleken kan worden met de andere contractgebieden.

Voor Strukton Rail en soortgelijke organisaties is het aan te bevelen om op korte termijn de datasets van de bodemdaling te downloaden en op een gestructureerde manier op te slaan op het eigen netwerk of in een GIS-service. Vervolgens kunnen de data geprepareerd worden voor toekomstige analyses en hoeven de datasets niet opnieuw opgehaald en verwerkt te worden.

Op langere termijn is het aan te bevelen om het gehele proces te automatiseren door het ontwikkelen van een workflow in FME of een soortgelijke software. In FME kunnen de data opgehaald en geprepareerd worden. In een geautomatiseerde workflow kan een grote hoeveelheid van de data gefilterd en verminderd worden. Dit kan door alleen de data te behouden die zich bevinden op specifieke locaties, zoals binnen een bepaalde afstand, nabij het spoor of alleen in de contractgebieden van de spooraannemers. Hierbij is het belangrijk om de consistentie van de afstanden aan te houden. Daarnaast is het belangrijk om rekening te houden met een krachtige computer om deze bewerkingen uit te voeren.

5.3 Vervolgonderzoek

Een vervolgonderzoek kan uitgevoerd worden naar de invloed van de baanbelasting op de bodemdaling nabij het spoor. Dit is een belangrijk onderwerp voor een vervolgonderzoek omdat de baanbelasting in dit onderzoek niet is behandeld en het niet kan uitgesloten worden dat het effect heeft op de bodemdaling. Om een volledig beeld te krijgen over de bodemdaling is een aanvullend onderzoek nodig om ook de bodemdaling binnen meerdere afstanden van het spoor te berekenen. Verder onderzoek naar de spoorliggingsproblemen is noodzakelijk om te bepalen of de problemen in de spoorgeometrie zijn toegenomen na de laatste meting in 2019.

Literatuurlijst

- Actorenregister. (z.d.). *ProRail B.V. (VenW)*: 1995. Geraadpleegd op 21 april 2021, van <https://actorenregister.nationaalarchief.nl/actor-organisatie/prorail-bv-venw>
- Alterra Wageningen UR. (2006). *Grondsoortenkaart* [Illustratie]. Geraadpleegd van <https://www.wur.nl/nl/show/Grondsoortenkaart.htm>
- Bodemdalingskaart 2.0. (z.d.). *Uitleg*. Geraadpleegd op 3 juni 2021, van <https://bodemdalingkaart.nl/nl/disclaimer/>
- Bogaard, P. V. D. (2019, 26 juli). *ProRail heroverweegt PGO-contracten*. Geraadpleegd op 21 april 2021, van <https://www.spoorpro.nl/spoorbouw/2019/07/26/prorail-heroverweegt-pgo-contracten/>
- Buijs, E. (2016). *Inklinking veen in Waterland*. (Open research Amsterdam, Red.). Geraadpleegd van <https://openresearch.amsterdam.nl/page/59574/inklinking-veen-in-waterland>
- Cavallo, R. (2007). De spoorwegen en de Nederlandse stad. *OverHolland*, 5, 43–61. <https://doi.org/10.7480/overholland.2007.5>
- CBS. (2018). *Onderzoek Verplaatsingen in Nederland (OVIN) 2017: Plausibiliteitsrapportage*. Geraadpleegd van <https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/onderzoeksomschrijvingen/korte-onderzoeksbeschrijvingen/onderzoek-verplaatsingen-in-nederland--ovin-->
- Cornell University. (2007). *Soil Texture*. Geraadpleegd op 21 april, van <http://nmssp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet29.pdf>
- De Bakker, H., & Schelling, J. (1966). *Systeem van bodemclassificatie voor Nederland: De hogere niveaus* (2de ed.). Wageningen, Nederland: Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie Wageningen.
- Dixon, J. (1991). Roles of clays in soils. *Applied Clay Science*, 5(5–6), 489–503. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(91\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90019-6)
- Esri. (z.d.). *Spatial Autocorrelation (Global Moran's I)*. Geraadpleegd op 7 mei 2021, van <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/spatial-autocorrelation.htm>
- Esri Nederland. (2018). *Bodemkaart* [Kaart]. Geraadpleegd van <https://esrinl-content.maps.arcgis.com/home/item.html?id=de58bafde7284c99836a54519fa9f3cd>
- Fokker, P. A., Gunnink, J. L., Koster, K., & Lange, G. (2019). Disentangling and Parameterizing Shallow Sources of Subsidence: Application to a Reclaimed Coastal Area, Flevoland, the Netherlands. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(5), 1099–1117. <https://doi.org/10.1029/2018jf004975>
- Geologie van Nederland. (z.d.-a). *Lössbodem*. Geraadpleegd op 23 april 2021, van <https://www.geologievannederland.nl/ondergrond/bodems/lossbodem-heuvelandschap>
- Geologie van Nederland. (z.d.-b). *Rivierkleibodem*. Geraadpleegd op 23 april 2021, van <https://www.geologievannederland.nl/ondergrond/bodems/rivierkleibodem-rivierkleilandschap>

Geologie van Nederland. (z.d.-c). *Zeekleibodem*. Geraadpleegd op 23 april 2021, van <https://www.geologievannederland.nl/ondergrond/bodems/zeekleibodem-zeekleilandschap>

Hoogland, T., van den Akker, J., & Brus, D. (2012). Modeling the subsidence of peat soils in the Dutch coastal area. *Geoderma*, 171–172, 92–97.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.013>

IBM. (z.d.). *SPSS Statistics*. Geraadpleegd op 7 mei 2021, van <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>

Jongmans, A. G., & Berg, D. V. M. W. (2013). *Landschappen van Nederland 1 en 2* (1ste ed.). Wageningen, Nederland: Wageningen Academic Publishers.

Milieu Centraal. (z.d.). *CO2-uitstoot fiets, ov en auto*. Geraadpleegd op 21 april 2021, van [https://www.milieucentraal.nl/duurzaam-vervoer/co2-uitstoot-fiets-ov-en-auto/#:%7E:text=Sinds%202017%20is%20reizen%20met,vervangend%20busvervoer%20\(ongeveer%205%25\)](https://www.milieucentraal.nl/duurzaam-vervoer/co2-uitstoot-fiets-ov-en-auto/#:%7E:text=Sinds%202017%20is%20reizen%20met,vervangend%20busvervoer%20(ongeveer%205%25))

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2014). *Beheerconcessie 2015–2025*. Geraadpleegd van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2014/12/15/bijlage-2-beheerconcessie-2015-2025>

NEN. (2019). *NEN-EN 13848–1 (en): Railtoepassingen - Bovenbouw - Geometrische kwaliteit van het spoor - Deel 1: Beschrijving van de spoorgeometrie* (ICS 93.100). Geraadpleegd van <https://www.nen.nl/nen-en-13848-1-2019-en-257518>

NS. (2020, 27 februari). *NS Jaarcijfers 2019 : Treinreiziger gaat er in 5 jaar fors op vooruit*. Geraadpleegd op 25 april 2021, van <https://nieuws.ns.nl/ns-jaarcijfers-2019--treinreiziger-gaat-er-in-5-jaar-fors-op-vooruit/>

NS. (z.d.). *Groene energie voor trein, bus en station*. Geraadpleegd op 21 april 2021, van <https://www.ns.nl/over-ns/duurzaamheid/fossielvrij/groene-energie-voor-trein-bus-en-station.html>

NutriNorm. (z.d.). *Indeling van de grondsoorten*. Geraadpleegd op 25 april 2021, van <https://nutrinorm.nl/bodem/aandachtspunten-op-zand-klei-en-veenbodems/indeling-van-de-grondsoorten/>

Osman, K. T. (2018). *Management of Soil Problems* (1ste ed.). Cham, Zwitserland: Springer International Publishing.

ProRail. (2019, 3 december). *180 jaar spoor: Het begin van de spoorwegen*. Geraadpleegd op 21 april 2021, van <https://www.prorail.nl/nieuws/180-jaar-spoor-het-begin-van-de-spoorwegen#:~:text=De%20geschiedenis%20van%20de%20spoorwegen,bekend%20als%20de%20Oude%20Lijn>

ProRail. (2020a). *Geleidingssysteem_006* [Dataset]. Geraadpleegd op 26 april 2021, van https://mapservices.prorail.nl/arcgis/rest/services/Geleidingssysteem_006/FeatureServer/info/metadata

ProRail. (2020b). *Kunstwerken_gebouwen_001* [Dataset]. Geraadpleegd op 26 april 2021, van https://mapservices.prorail.nl/arcgis/rest/services/Kunstwerken_gebouwen_001/FeatureServer

ProRail. (z.d.-a). *Aannemers kleinschalig onderhoud*. Geraadpleegd op 21 april 2021, van <https://www.prorail.nl/samenwerken/leveranciers/aannemers/onderhoudsaannemers>

ProRail. (z.d.-b). *Innoveren*. Geraadpleegd op 25 april 2021, van <https://www.prorail.nl/toekomst/innoveren>

Rommelink, G., Van Middelkoop, J., Ouweltjes, W., & Wemmenhove, H. (2014). *Handboek Melkveehouderij* (Vol. 29). Geraadpleegd van <https://edepot.wur.nl/329939>

Rijkswaterstaat. (z.d.). *Bodemdaling*. Geraadpleegd op 25 april 2021, van <https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/bodem-ondergrond/bodemdaling/>

SkyGeo. (z.d.). *InSAR Technical Background*. Geraadpleegd op 7 mei 2021, van <https://skygeo.com/insar-technical-background/>

Steur, G. G. L., Heijink, W., De Bakker, H., Boersma, O. H., & Hamming, C. (1991). *Bodemkaart van Nederland schaal 1:50000 : Algemene begrippen en indelingen* (4de ed.). Wageningen, Nederland: Staring Centrum.

Strukton Rail. (2019). *SRNL_01_02_06_STOPPLAN_EDITING* [Dataset]. Geraadpleegd op 26 april 2021, van <https://struktonrail.maps.arcgis.com/home/group.html?id=37f1387c986949e6bfd61caa1b2868dd#overview>

TNO. (2020, 20 april). *Subsidence: A slow-motion problem*. Geraadpleegd op 24 april 2021, van <https://www.tno.nl/en/tno-insights/articles/subsidence-a-slow-motion-problem/>

Van Asselen, S., Erkens, G., Stouthamer, E., Woolderink, H. A., Geeraert, R. E., & Hefting, M. M. (2018). The relative contribution of peat compaction and oxidation to subsidence in built-up areas in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Science of The Total Environment*, 636, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.141>

Van Asselen, S., Kooi, H., & Van den Akker, J. H. (2020). *Deltafact: Bodemdaling* (3.1). Geraadpleegd van <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/DELTAFACTS/Deltafacts%20NL%20PDF%20nieuw%20format/Bodemdaling%20versie%203.1%20%28feb%202020%29.pdf>

Van den Born, G. J., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B., Van Bommel, B., & Van der Sluis, S. (2016). *Dalende bodems, stijgende kosten: Mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied* (1064). PBL. Geraadpleegd van <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-dalende-bodems-stijgende-kosten-1064.pdf>

Verzandvoort-van Dijk, S. J. E., & Kuikman, P. J. (2009). *Klimaatverandering, klimaatadaptatie en bodem: Maakbaarheid, planvorming en realiteitsdenken* (014/09). Geraadpleegd van <https://edepot.wur.nl/50829>

Bijlage I Interviewprotocol m.b.t. het stopplan

Dit interviewprotocol is opgesteld om inzicht te krijgen in de spoorligging. Het interview wordt via MS Teams afgenomen bij twee collega's die specialisten zijn op het gebied van spoorbaan. De interviews zullen maximaal 30 minuten duren en worden in week 20 afgenomen.

Soort vragen: Open en gesloten.

Volgorde van vragen: Van de spoorliggingsproblemen tot de mogelijke oorzaken en gevolgen.

De volgende vragen zullen gesteld worden tijdens de interviews:

1. Wie ben je en wat is je functie binnen Strukton Rail?
2. Kun je iets vertellen over je werk?
3. Ben je bekend met het stopplan?
 - a. Indien de persoon bekend is met het stopplan: Waar wordt het stopplan voor gebruikt?
 - b. Indien de persoon niet bekend is met het stopplan, moet er uitgelegd worden wat het stopplan is.
4. Hoe vaak wordt de spoorgeometrie gemeten?
5. Hoe zijn de afkeurwaardes ingedeeld?
6. Hoe vaak wijken de waardes af van de spoorparameters?
7. Wat zijn de mogelijke oorzaken van de spoorliggingsproblemen?
8. Waar worden de meeste problemen geconstateerd in de contract gebieden?
9. Wat zijn de gevolgen van deze problemen?
10. Hoe worden de problemen opgelost?
11. Zijn er naast het stopplan nog andere datasets beschikbaar nabij metingen van de spoorgeometrie?

Bijlage II Data verzamelen deelvraag 1

Zoekaspecten:

Welke zoekaspecten er gebruikt zijn is opgenomen in Tabel 8.

Tabel 7 Zoekaspecten voor deelvraag 1

Aspect 1	Aspect 2	Aspect 3
Bodemdalingsdata	Bodemdalingskaart Nederland	Grondsoortenkaart Nederland

Resultaten:

De resultaten die zijn gevonden zijn opgenomen in Tabel 9.

Tabel 8 Gevonden resultaten

Gevonden informatie	Beschrijving
Dataset bodemdaling via https://data.overheid.nl/community/datarequest/dataset-bodemdaling	Deze dataset dateert uit 2019 en kan niet worden gedownload of aangevraagd.
Bodemkaart 2.0 via https://bodemdalingsskaart.nl/nl/	Deze dataset is de meest complete dataset en wordt regelmatig geüpdatet.
Bodemdaling diep, tbv de Atlas Leefomgeving via https://data.overheid.nl/dataset/0117d65e-3dc0-4262-abf3-9ab783176d2c	Deze dataset is recent nog geüpdated, maar de focus ligt op de diepe bodemdaling en gaswinning. Deze informatie is niet relevant voor dit onderzoek.
Grondsoortenkaart WUR	Deze dataset is gebruikt om de gemiddelde bodemdaling per type grondsoort te berekenen.

Als eerst is een aanvraag gedaan via de website van bodemdalingsskaart 2.0 om de bodemdalingssdata te downloaden. Na de aanvraag zijn de zes tracks gedownload. In totaal zijn de zes tracks bij elkaar 350 gigabyte. De metingen zijn in een .CSV bestand aangeleverd. De bodemdalingssdata bestaat uit meetpunten die door de satellieten zijn gemeten in de periode van januari 2015 tot en met juni 2020.

Bijlage III Data prepareren deelvraag 1

Om de mate van bodemdaling te berekenen in de contractgebieden van Strukton Rail is als tweede stap de datasets geprepareerd voor de vervolgstappen.

Voor de eerste analyse zijn als eerst alle spoorwegen van Nederland in kaart gebracht. Vervolgens is door een GIS-analyse de spoorwegen eruit gehaald die in de contractgebieden van Strukton Rail vallen. In Figuur 16 is een overzichtskaart te zien van alle spoorwegen in Nederland. In Figuur 17 is een overzichtskaart te zien van alle spoorwegen in de contractgebieden van Strukton Rail.



Figuur 16 Alle spoorwegen in Nederland

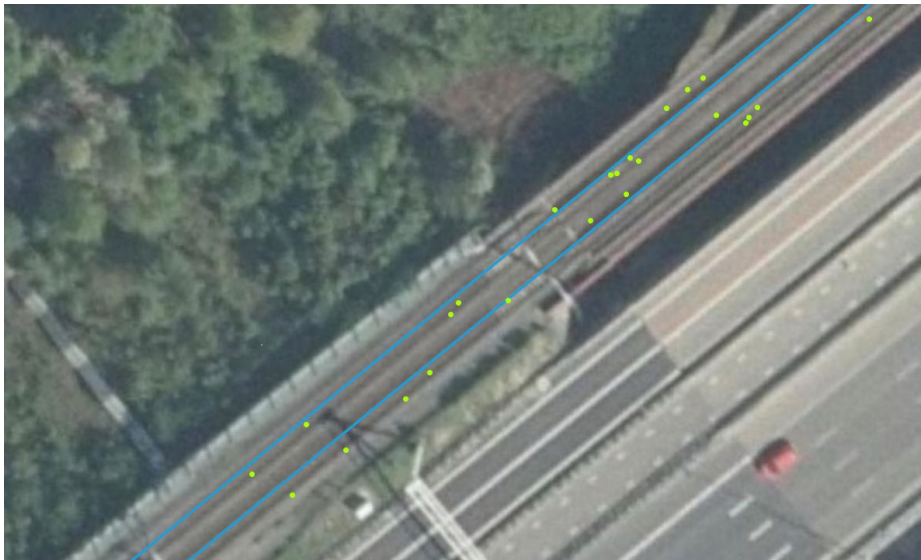


Figuur 17 Spoorwegen in de contractgebieden van Strukton Rail, na een GIS-analyse

In Figuur 18 is een voorbeeld te zien hoe de meetpunten zijn verspreid over een locatie voordat de GIS-analyse is uitgevoerd. De blauwe lijnen tonen de spoorwegen aan. Middels een GIS-analyse zijn de meetpunten eruit gehaald die twee meter van het spoor vandaan zijn waargenomen. In Figuur 19 is een voorbeeld te zien van de overgebleven meetpunten van dezelfde locatie als in Figuur 18. Na de analyses zijn de meetpunten van 165 miljoen naar 189.716 gezakt.

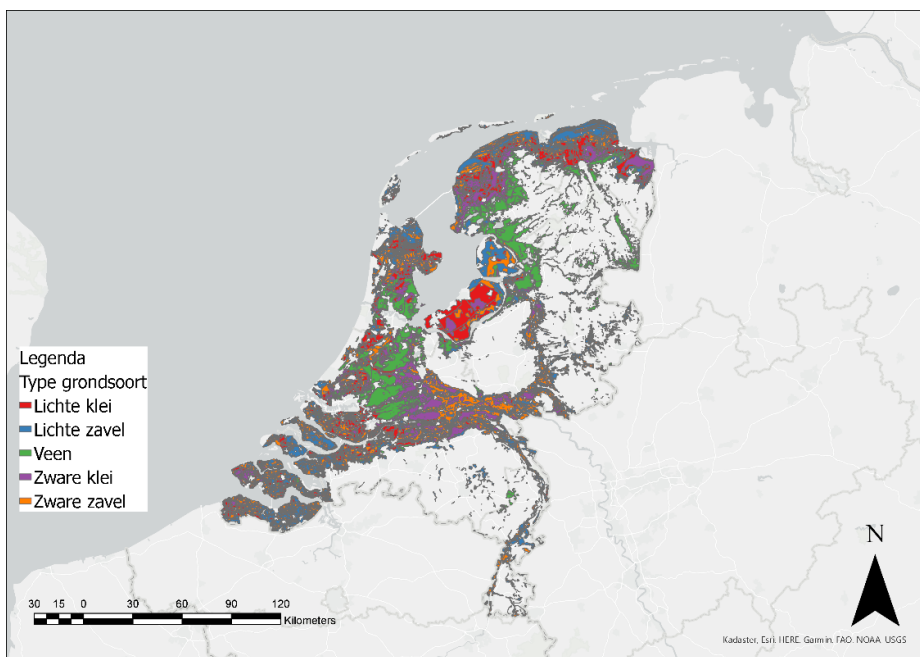


Figuur 18 Meetpunten die zijn waargenomen door de satellieten

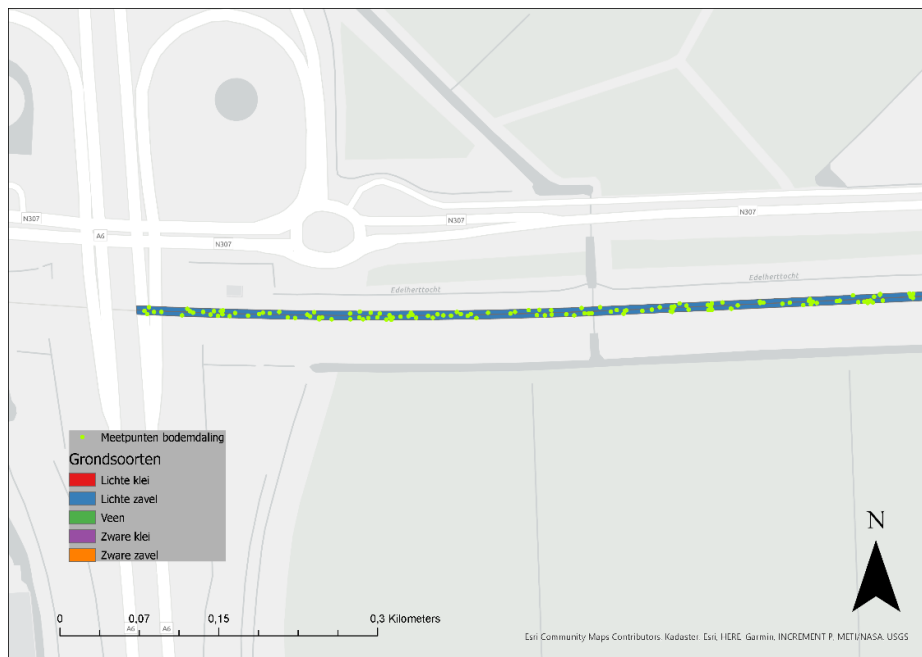


Figuur 19 Meetpunten die zijn overgebleven na de GIS-analyse

Voor de tweede analyse is de data van de bodemdaling, spoorwegen en grondsoorten gebruikt. De grondsoorten lichte klei, zware klei, veen, lichte zavel en zware zavel zijn gebruikt om de gemiddelde bodemdaling te berekenen per grondsoort. Uit Figuur 20 zijn de typen grondsoorten af te leiden voor Nederland. Daarvoor zijn de bovenstaande typen gronden die binnen twee meter van het spoor kruizen eruit gehaald. In Figuur 21 is een voorbeeld te zien van het resultaat uit de GIS-analyse.



Figuur 20 Overzichtskaart van de gekozen typen grondsoorten in Nederland



Figuur 21 Type grondsoort die kruist binnen 2 meter van het spoor met daarin de meetpunten die zijn waargenomen door de satellieten

Voor de derde analyse zijn de meetpunten die 50 meter van een kunstwerk kruisen eruit gehaald. In Figuur 22 is een overzichtkaart te zien met een kunstwerk. In deze kaart staan alle meetpunten die zijn waargenomen twee meter van het spoor vandaan. Met een GIS-analyse zijn de meetpunten die binnen 50 meter van een kunstwerk, duiker of overweg zijn waargenomen eruit gehaald. De uitkomst is in Figuur 23 te zien.



Figuur 22 Een kunstwerk met meetpunten die overlappen

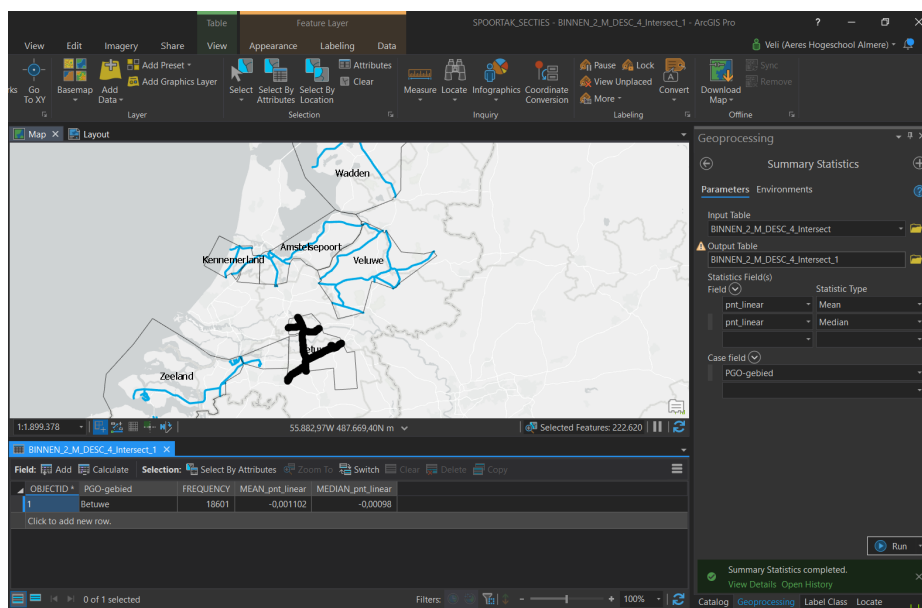


Figuur 23 Meetpunten die zijn overgebleven na de GIS-analyse

Bijlage IV Data analyseren deelvraag 1

Met de data na het prepareren van de datasets is er analyses gedraaid in ArcGIS Pro om de gemiddelde bodemdaling te achterhalen.

Voor het berekenen van de gemiddelde bodemdaling is de tool 'Summary statistics' in ArcGIS Pro gebruikt. In de dataset van de bodemdaling is het gemiddelde van één meetpunt al berekend en is opgenomen in het veld 'pmt_linear'. In Figuur 24 is een voorbeeld te zien hoe de gemiddelde bodemdaling is berekend voor het contractgebied Betuwe in ArcGIS Pro. Deze analyse is voor iedere contractgebied gedraaid. Dezelfde analyses zijn ook uitgevoerd om de gemiddelde bodemdaling in de buurt van klei- en veengronden te berekenen, en de bodemdaling die niet in buurt van kunstwerken zijn waargenomen.



Figuur 24 Voorbeeld om de bodemdaling per contractgebied te berekenen

Bijlage V Data verzamelen en prepareren deelvraag 2

Voor deelvraag 2 is de data verzameld uit het stopplan en de data van de kunstwerken. Na het verzamelen zijn beide datasets verwerkt in ArcGIS Pro. Als eerst zijn de gebreken waaronder een object zoals een kunstwerk, duiker of overweg is vastgelegd eruit gehaald. Dit is gedaan door de intersect tool te gebruiken. Daarbij zijn de gebreken die binnen een afstand van twee meter zijn gemeten eruit gehaald. In Figuur 25 zijn de gebreken die zijn geconstateerd binnen twee meter van een kunstwerk gemarkeerd en vervolgens uit de dataset gehaald. Daaruit is het aantal gebreken naar voren gekomen, en aantal gebreken per prioriteit naar voren gekomen.



Figuur 25 Een gemeten gebrek die kruist met een kunstwerk

Bijlage VI Data prepareren deelvraag 3

Voor de derde deelvraag is er gebruik gemaakt van de datasets uit deelvraag 1 en 2 die voor een grote gedeelte al geprepareerd zijn. Als eerst is een buffer gemaakt van tien meter om de spoorgebreen heen. Deze buffers zijn gemaakt om de gemiddelde bodemdaling per gemeten gebrek te berekenen. In Figuur 26 is een voorbeeld te zien van de gemeten spoor gebreen. In Figuur 27 is een voorbeeld te zien met een buffer om de spoor gebreen heen.



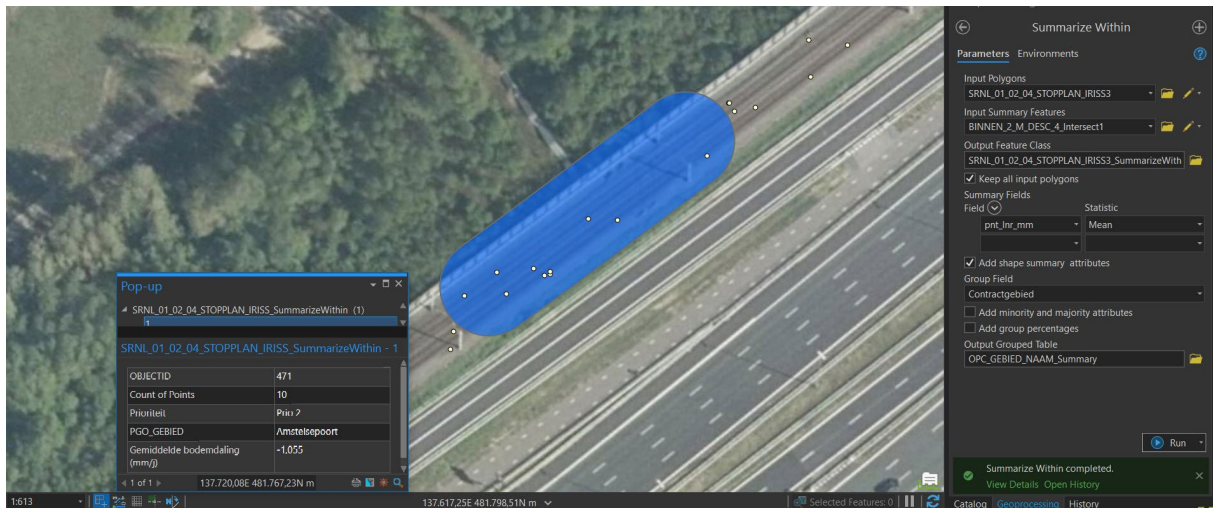
Figuur 26 Voorbeeld van de gemeten spoor gebreen zonder buffer



Figuur 27 Voorbeeld van de gemeten spoorgebreen met een buffer

Bijlage VII Data analyseren deelvraag 3

Nadat de buffers zijn gemaakt om de spoorgebieden is met de tool 'Summarize within' in ArcGIS Pro de gemiddelde bodemdaling berekend van de meetpunten die binnen deze buffer zijn waargenomen. In Figuur 28 is te zien hoe de analyse is gemaakt met tool in ArcGIS Pro en de uitkomst daarvan is een pop-up te zien. In de pop-up staat het aantal punten dat is geanalyseerd in de buffer en de gemiddelde bodemdaling.



Figuur 28 Overzicht van de summarize within tool en de uitkomst in een pop-up