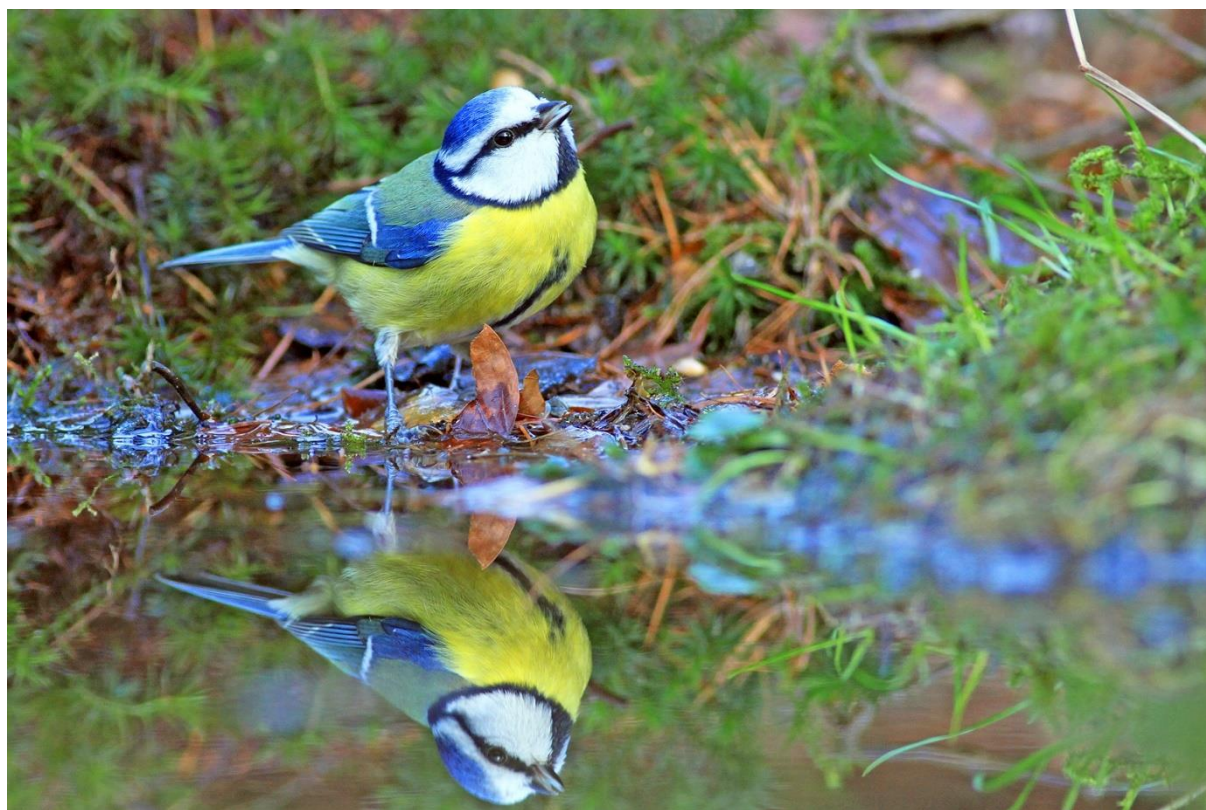


Effecten van bodemverzuring door stikstofdepositie op broedvogels van bossen op hoge zandgronden in Nederland



Eindrapport afstudeeronderzoek
Pauline Alefs-de Bakker
Jan Borst

Mei 2018



**van hall
larenstein**
university of applied sciences



Radboud University



Voorpagina: *Pimpelmees (Cyanistes caeruleus)*. Fotograaf: Jan Borst

Effecten van bodemverzuring door stikstofdepositie op broedvogels van bossen op hoge zandgronden in Nederland

Pauline Alefs-de Bakker
Jan Borst
Mei 2018

Eindrapport afstudeeronderzoek
Bos- en Natuurbeheer
Toegepaste ecologie
Hogeschool Van Hall Larenstein

Begeleiders:
Drs. Jos Wintermans (VHL)
Prof. Dr. Henk Siepel (RU)
Dr. Chris van Turnhout (Sovon)



Radboud University



Trefwoorden: broedvogels, stikstofdepositie, zandgronden

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeronderzoek van Jan Borst en Pauline Alefs-de Bakker. Het idee hiervoor is ontstaan in samenwerking met vele partners: Chris van Turnhout en Ruud Foppen namens Sovon, Henk Siepel namens de vakgroep dierecologie van de Radboud Universiteit, Arnold van den Burg van Stichting BioSFeer en Marijn Nijssen van Stichting Bargerveen. Van december 2017 tot juni 2018 zijn wij bezig geweest met de uitvoering en rapportage van het onderzoek.

In het proces hebben wij veel kennis en vaardigheden die we tijdens onze opleiding geleerd hebben op geïntegreerde wijze toegepast, op het gebied van bodemkunde, ecologie, GIS en statistiek. Tijdens het proces zijn wij begeleid door Jos Wintermans van de Hogeschool Van Hall Larenstein en hebben wij bij de statistische analyse hulp gehad van Jurriën van Deijk. De bestaande data bleken ontoereikend om de hoofdvraag te beantwoorden zoals die in het projectplan vastgelegd was, maar met de beschikbare data hebben wij nieuwe en verrassende inzichten kunnen vergaren.

Terugkijkend bleek het fundamenteel ecologische vraagstuk waarmee wij geworsteld hebben wat te complex voor onze bacheloropleiding, maar: *“Intelligence without ambition, is a bird without wings.”* (Salvador Dali). Bij dezen willen wij Sovon danken voor het beschikbaar stellen van data die zonder het werk van vrijwillige waarnemers en nestkastonderzoekers niet zouden bestaan. Daarnaast willen wij alle samenwerkingspartners en begeleiders bedanken voor hun motiverende woorden, adviezen en begeleiding.

Wij wensen u veel leesplezier,

Jan Borst & Pauline Alefs-de Bakker

Velp, 31 mei 2018

Samenvatting

Inleiding: Recente bevindingen in bossen op hoge zandgronden van de Veluwe wijzen op calciumdeficiëntie bij mezen, veroorzaakt door versnelde bodemverzuring als gevolg van stikstofdepositie. Calciumdeficiëntie kan bij broedvogels leiden tot verminderd broedsucces en afnemende populatietrends. Het doel van dit afstudeeronderzoek was: bepalen of er verschillen zijn in populatietrends en broedsucces van bosvogels op voedselarme zandgronden in Nederland met verschillende maten van verzuringgevoeligheid en stikstofbelasting.

Methode: Data uit het Broedvogel Monitoring Project van Sovon bleken ontoereikend om populatietrends op verzuringgevoelige haarpodzolgronden en minder verzuringgevoelige bruine bosgronden met elkaar te vergelijken. Beschikbare regionale populatietrends van de kool- en pimpelmees, alsmede van de bonte vliegenvanger op hoge zandgronden zijn met elkaar vergeleken. Daarnaast zijn gegevens over het broedsucces op twee bodemtypen door middel van regressieanalyse met elkaar vergeleken.

Resultaten: Populatietrends van bosvogels op hoge zandgronden in Midden-Nederland liggen iets lager dan het landelijk gemiddelde voor hoge zandgronden. De kool- en de pimpelmees vertonen zowel landelijk als regionaal een matige afname en de bonte vliegenvanger laat een matige toename zien. Er is geen statistisch significant verschil gevonden in aandeel succesvolle nesten van kool-, pimpelmezen en bonte vliegenvangers op meer en minder verzuringgevoelige bodems. Koolmezen en bonte vliegenvangers hadden een hoger gemiddeld aantal uitgevlogen jongen op verzuringgevoelige bodems.

Conclusie en discussie: Met beschikbare data kon de hoofdvraag niet beantwoord worden. De regionale populatietrend van kool- en pimpelmezen in Midden-Nederland is afnemend, maar er kon niet worden aangetoond of uitgesloten dat er een verband is tussen bodemverzuring en deze afnemende trend. De regionale populatietrend van bonte vliegenvangers neemt toe en dit is waarschijnlijk te verklaren door een aanpassing aan klimaatverandering. Op basis van de analyse van het broedsucces kan niet bevestigd worden dat broedvogels op verzuringgevoelige bodems een geringer broedsucces hebben dan op minder verzuringgevoelige bodems. Integendeel, er zijn aanwijzingen dat het broedsucces hoger is op verzuringgevoelige bodems, maar dit blijkt alleen uit het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen en niet uit het aandeel succesvolle nesten. Vervolgonderzoek is noodzakelijk om de effecten van stikstofdepositie op broedvogels van bossen op hoge zandgronden te begrijpen.

Inhoud

1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemanalyse	1
1.2.1 De rol van calcium in de levenscyclus van broedvogels	1
1.2.2 De gevolgen van calciumdeficiëntie voor broedvogels	3
1.2.3 Het proces van bodemverzuring	4
1.2.4 De oorzaken van bodemverzuring in Nederland	7
1.2.5 Het verband tussen bodemverzuring en calciumdeficiëntie bij broedvogels	9
1.3 Relevantie van dit afstudeeronderzoek	11
1.3.1 Wetenschappelijke relevantie	11
1.3.2 Politieke en maatschappelijke relevantie	11
1.3.3 Relevantie voor de opdrachtgevers (Sovon en Radboud Universiteit)	11
1.4 Doelstelling	11
1.5 Vraagstelling	12
2. Methode	13
2.1 Het onderzoeksgebied	13
2.2 Materiaal	14
2.2.1 Populatietrends van broedvogels op droge zandgronden	15
2.2.2 Broedsucces op droge zandgronden	16
2.2.3 Stikstofdepositie	16
2.3 Statistische analyse	17
2.3.1 Analyse van de populatietrends	17
2.3.2 Analyse van het broedsucces	17
2.3.3 Analyse van de effecten van stikstofdepositie	17
3. Resultaten	18
3.1 Populatietrends van broedvogels op hoge zandgronden	18
3.2 Trends in broedsucces op meer en minder verzuringgevoelige zandgronden	20
3.2.1 Het aandeel succesvolle nesten	20
3.2.2 Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest	21
3.3 Het verband tussen de gevonden trends en stikstofdepositie	23
4. Discussie	25
4.1 Kritische reflectie op de bevindingen	25
4.1.1 Kritische reflectie op de populatietrends	25

4.1.2 Kritische reflectie op de ontwikkelingen in broedsucces	26
4.2 Kritische reflectie op de methodiek	27
4.2.1 Kritische reflectie op de methodiek met betrekking tot populatietrends	27
4.2.1 Kritische reflectie op de methodiek met betrekking tot broedsucces	28
4.3 Reikwijdte van de resultaten en volgende stappen in onderzoek	31
5. Conclusie	33
6. Aanbevelingen voor de praktijk	34
Referenties	35
Bijlagen	43
Bijlage 1: Ligging hoge zandgronden in Nederland	44
Bijlage 2: Ligging haarpodzolgronden en bruine bosgronden in Nederland	45
Bijlage 3: Detailbeeld ligging haarpodzolgronden en bruine bosgronden in Nederland	46
Bijlage 4: Ligging BMP-plots, regio Midden	47
Bijlage 5: Ligging BMP-plots, regio Zuid	48
Bijlage 6: Ligging nestkasten	49
Bijlage 7: Toelichting 'Statistische Power'	50
Bijlage 8: Keuze voor lineaire en logistische regressieanalyse	51
Bijlage 9: Data-exploratie volgens het protocol van Zuur et al. (2010)	52
Bijlage 10: Stikstofdepositie in Nederland	65
Bijlage 11: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Utrechtse heuvelrug)	66
Bijlage 12: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Veluwe)	67
Bijlage 13: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Salland en Achterhoek)	68

1. Inleiding

“U heeft mij een stenografisch verslag gestuurd van het ordedebat van 21 juni jl. (Handelingen II 2016/17, nr. 90, Regeling van Werkzaamheden). In dit verslag wordt mij gevraagd te reageren op de bevindingen van het artikel van Stichting BioSFeer «Rammelende eieren en brekebenen bij de koolmees: verzuring terug bij af», dat gepubliceerd is in het Vakblad Natuur Bos Landschap, nr. 136, van deze maand. Daarbij wordt door de leden met name gewezen op het uitblijven van effecten van maatregelen die de stikstofuitstoot mitigeren.”

- Citaat uit: Brief van de staatssecretaris van economische zaken aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten Generaal, Den Haag 6 juli 2017 -

1.1 Aanleiding

In juni 2017 heeft Van den Burg een artikel gepubliceerd, getiteld: *“Rammelende eieren en brekebenen bij de koolmees: verzuring terug bij af?”* waarin hij recente bevindingen beschrijft die wijzen op calciumdeficiëntie bij koolmezen (*Parus major*) in het Ginkelse bos (gelegen op zandbodem op de Veluwe) (Van den Burg, 2017). Deze bevindingen betroffen afwijkingen in pigmentatie en porositeit van de eierschalen, eieren die niet uitkwamen, jongen met gebroken of buigbare poten en een toegenomen mortaliteit onder jongen met deze symptomen. Van den Burg maakt in het artikel een vergelijking met een koolmezenpopulatie in het Edese bos (nabij het Ginkelse bos, echter met een voedselrijkere zandbodem) en concludeert dat er significante verschillen zijn die hij niet aan natuurlijke variatie kan toeschrijven. Van den Burg beargumenteert dat stikstofdepositie aan de basis van deze problematiek zou kunnen liggen.

1.2 Probleemanalyse

1.2.1 De rol van calcium in de levenscyclus van broedvogels

Voor de productie van eieren hebben broedvogels voldoende water, macronutriënten (koolhydraten, eiwitten en vetten) en micronutriënten (essentiële vetten, aminozuren, vitaminen en ionen) nodig. Van de tekorten in micronutriënten leidt een calciumtekort het meest tot een limitatie in het broedsucces (Burley & Vahedra, 1989). De eierschaal bestaat voor 98% uit calcië, een kristallijne vorm van calciumcarbonaat (CaCO_3) (Romanoff & Romanoff, 1949). De eierschaal bevat alle nutriënten die het embryo nodig heeft om zich te kunnen ontwikkelen, behoedt het embryo ervoor om geplet te worden door de broedende oudervogel, beschermt het tegen dehydratie, vormt een barrière tegen pathogenen en maakt gaswisseling mogelijk (Reynolds & Perrins, 2010). Om het skelet op te bouwen absorbeert het embryo bovendien calcium uit de eierschaal, die hierdoor tijdens de incubatie 6% (Balkan et al., 2006) tot 21% (Booth & Seymour, 1987) dunner wordt. Ook na de productie van het ei, hebben oudervogels een verhoogde behoefte aan calciumrijk voedsel, om hun jongen te voorzien van voedsel voor de skeletopbouw (Graveland, 1996a; Starck, 1998).

Macronutriënten worden voorafgaand aan de eileg door vogels opgeslagen (Figuur 1) (Korschen, 1977) en zijn daarom zelden limiterend voor de voortplanting (Nager et al., 1997). Calcium is wél limiterend; dit komt doordat vogels calcium niet langdurig kunnen opslaan in de periode voorafgaand aan de eileg (Graveland & Van Gijzen, 1994; Piersma et al., 1996). De enkele soorten waarvan bekend is dat zij wel calcium kunnen opslaan, zoals de kanoet (*Calidris canutus*), slaan calcium op in hun skelet (Piersma et al., 1996). Hierbij neemt de skeletmassa in enkele weken voor de migratie toe met 30-50%. Als resultaat daarvan kunnen kanoeten twee van hun vier eieren leggen zonder calciumbronnen aan te boren op de broedgronden (Piersma et al., 1996). Berekeningen tonen aan dat een vergelijkbare opslag voor kleinere zangvogels onmogelijk is: het skelet van de vogel zou te zwaar worden om de migratieafstand te overbruggen (Reynolds & Perrins, 2010). Migrerende zang- en standvogels zijn daardoor afhankelijk van calciumbronnen op de broedgronden om eieren te vormen (Graveland & Van Gijzen, 1994).



Figuur 1. De borst ter hoogte van het furculum van de zwartkopkardinaal (*Pheucticus melanocephalus*). Tijdens het ringen wordt de vetvoorraad bepaald. Men blaast hiervoor voorzichtig de veren aan de kant en vanwege de dunne huid geeft de hoeveelheid rood versus geel weefsel een beeld van de vetvoorraad die de vogel bij zich draagt. Figuur A: geen vet opgeslagen of vetreserves uitgeput. Gewicht vogel: ± 40 gram. Figuur B: maximale vetreserve. Gewicht vogel: ± 60 gram. (Blog of the Vancouver Avian Research Centre, 2017)

Voor de korte termijn blijkt de opslag van calcium in het skelet bij zangvogels wél een belangrijk mechanisme. Uit onderzoek van Graveland en Berends (1997) blijkt dat zangvogels in hun dieet weinig tot geen calciumbronnen opnemen, maar vlak voor de eileg hun calciumconsumptie drastisch verhogen. Broedvogels slaan daarbij het ingenomen calcium op als medullair bot en gebruiken dat 's nachts om genoeg calcium vrij te maken voor de formatie van een ei (Krementz & Ankney, 1995 en Simkiss, 1967). Dit is ook te zien in het foerageerpatroon van broedvogels; veel soorten die vroeg in de ochtend een ei leggen, vertonen in de vooravond daarvan een piek in de consumptie van calciumrijk voedsel (Schifferli, 1976; Graveland & Berends, 1997). Dit zou verklaren waarom er weinig observaties zijn van vogels die calciumbronnen tot zich nemen: zij doen dit tussen schemer en duisternis (Graveland en Van Gijzen, 1994). Desondanks zijn er diverse studies over observaties van calciumconsumptie door broedvogels (Tabel 1).

Tabel 1. Calciumrijk materiaal waarvan geobserveerd is dat wilde broedvogels het opnemen in hun dieet (selectie van Nederlandse vogelsoorten en in Europa uitgevoerd onderzoek) (Bures & Weidinger, 2003; Reynolds & Perrins, 2010)

Materiaal	Soorten	Referenties
Schelp van huisjesslak	Duiven (<i>Columba</i> spp. en <i>Streptopelia</i> spp.) Koolmees Zwarte mees Huismus Bonte vliegenvanger Goudhaan en vuurgoudhaan	(Murton, Westwood, & Isaacson, 1964) (Graveland et al., 1994 en 1996a) (Betts, 1955) (Schifferli, 1976) (Eeva & Lehikoinen, 1995) (Thaler, 1979)
Miljoenpoten (<i>Diplopoda</i>)	Bonte vliegenvanger	(Bures & Weidinger, 2003)
Pissebedden (<i>Isopoda</i>)	Bonte vliegenvanger	(Bures & Weidinger, 2003)
Bot(fragmenten) van gewervelden	Goudplevier Strandlopers en snippen	(Byrkjedal, 1975) (MacLean, 1974)
Grit	Huismus	(Pinowska & Krasnicki, 1985)
Eischaal van de kip	Koolmees	(Graveland, 1996a)
Cement tussen stenen	Kruisbek	(Susic, 1981)
Vergaand hout	Barmsijs en grote kruisbek	(Pullianen, Kallio, & Hallaksela, 1978)

1.2.2 De gevolgen van calciumdeficiëntie voor broedvogels

Calciumdeficiëntie leidt bij broedvogels op directe en indirecte wijze tot een scala van verschijnselen. In eerste instantie passen ze hun foerageergedrag aan; ze gaan selectief op calciumrijk voedsel uit (Sadler, 1961). Graveland en Berends toonden in 1997 aan dat in gevangenschap gehouden koolmezen hun zoektijd voor voedsel verdubbelen als er geen calciumbron aanwezig is. Uit onderzoek aan in het wild levende vogels in het Verenigd Koninkrijk blijkt bovendien dat vrouwelijke koolmezen interterritoriaal (>300 m van het nest) foerageren tijdens het leggen van eieren om aan voldoende calcium te komen (Wilkin et al., 2009). Deze toegenomen foerageertijd gaat ten koste van de tijd die broedvogels besteden aan uitrusten, veren poetsen en slapen (Graveland & Berends, 1997). Bij gebrek aan calcium zijn er ook vogelsoorten die hun eigen eieren opeten (Graveland & Berends, 1997) of hun jongen bizarre objecten voeren, zoals plastic en porselein (Mundy & Ledger, 1976).

In tweede instantie kunnen problemen optreden in de formatie van eieren: de schaal wordt dunner en pigmentatiepatronen lokaliseren zich op de plaatsen waar de eierschaal het dunste is (Figuur 2a) (Gosler et al., 2005). Mogelijk compenseren deze pigmenten de dunne plekken van de eierschaal door de schaal ter plaatse te versterken (Gosler et al., 2005). Verder kan de eierschaal te poreus worden, waardoor vocht uit het ei verdampt tijdens de incubatie; zelfs als de schaal compleet, maar dun is (Ar et al., 1974). Embryo's die opgroeien in een eierschaal van slechte kwaliteit, kunnen de schaal minder goed gebruiken om hun skelet op te bouwen (Karlsson & Lilja, 2008) en krijgen als gevolg daarvan hypocalciëmie, wat leidt tot problemen in de ionenbalans in de dooierzak (Hoyt, 1979) en uiteindelijk tot het verlies van vocht op verkeerde momenten tijdens de incubatie. Hierdoor ontwikkelt het embryo nierfalen of een groeiachterstand (Dunn & Boone, 1977); in andere gevallen vindt er zoveel verdamping plaats dat het embryo niet goed tot ontwikkeling komt (Figuur 2b) (Van den Burg, 2017). In de ernstigste gevallen van calciumdeficiëntie kan het gebeuren dat vogels hun legselgrootte verminderen (Dale, 1954) of zelfs geheel niet meer overgaan tot broeden (Carlsson et al., 1991). Al deze verschijnselen kunnen leiden tot een verminderd broedsucces (Graveland, 1996a).



Figuur 2. Figuur 2a toont afwijkende ei-pigmentatie bij de koolmees; Figuur 2b toont een opengemaakt rammelend ei, waarbij te zien is dat de inhoud van het ei los gekomen is van de schaal als gevolg van verdamping (Van den Burg, 2017)

In derde instantie wordt het jong wel geboren, maar heeft het afwijkingen aan het skelet of ontwikkelt het deze afwijkingen in de eerste levensdagen. Calciumdeficiëntie leidt bij juveniele vogels tot rachitis (de Matos, 2008; Graveland, 1996b; Beintema et al., 1997): een stoornis in de mineralisatie van nieuw gevormd osteoïd in de groeischijven van de botten, waardoor geleidelijke verzwakkingen van de botten optreden (Itakura et al., 1978). Hierdoor kunnen botten breken, zacht zijn of zelfs 'vouwbaar' (Figuur 3); bij een marginaal calciumtekort staat vooral een groeistoornis centraal (Itakura et al., 1978).

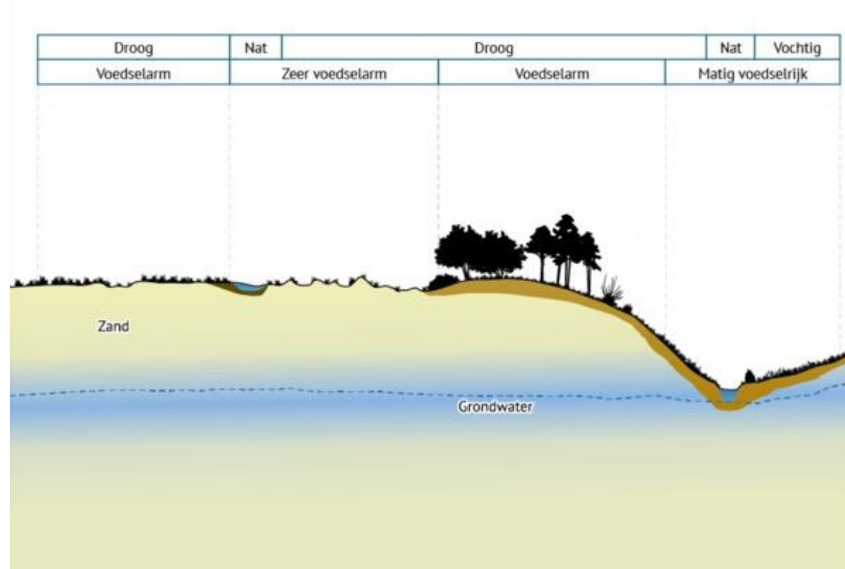


Figuur 3. Figuur 3a: koolmees met twee gebroken poten; Figuur 3b: zwarte mees met een gebroken bekken, dijbeen en scheenbeen (Van den Burg, 2017)

Tenslotte limiteert calciumdeficiëntie op indirecte wijze de reproductie van vogels als door sterke verzuring van de bodem toxische kationen zoals aluminium en cadmium stapelen in de voedselketen, waardoor de mechanismen van calciumopname bij vogels ernstig verstoord kunnen raken (Eeva & Lehikoinen, 1995; Scheuhammer, 1991). Toxische kationen stapelen zich vervolgens ook op in de weefsels van vogels, kunnen daar tot schade leiden en de calciumopname door de darmen verstoren. Deze problemen openbaren zich vaak pas als er daadwerkelijk calciumtekorten ontstaan (Scheuhammer, 1987); toxische kationen 'winnen' het dan van calciumionen in het proteïnetransport en vogels gaan in dat geval tekenen vertonen van calciumtekorten (Six & Goyer, 1970).

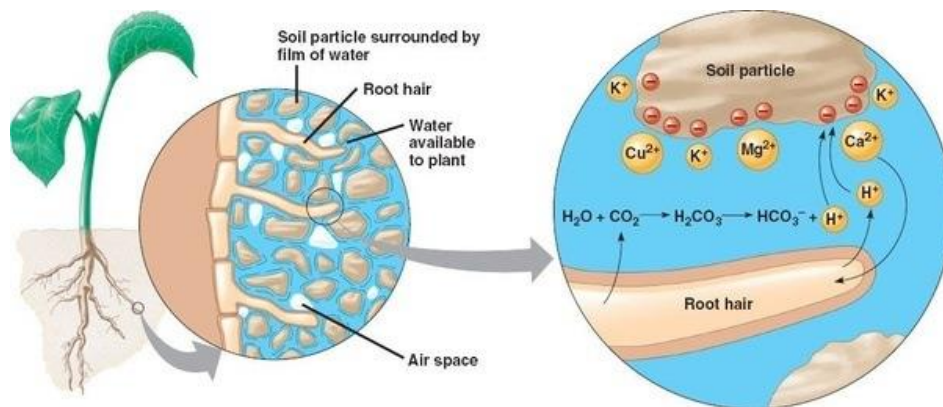
1.2.3 Het proces van bodemverzuring

Bodemverzuring is een proces dat mogelijk aan de basis ligt van calciumdeficiëntie bij broedvogels van bossen op hoge zandgronden. Bij bodemverzuring nemen stoffen in de bodem toe die waterstofionen (H^+ : 'zuur') afgeven (Ferm et al., 2000). In de bodem zijn echter ook stoffen aanwezig die deze waterstofionen kunnen bufferen of neutraliseren. De hoeveelheid bufferende stoffen in de bodem is afhankelijk van het uitgangsmateriaal (bijv. zand of klei) en de aanwezigheid van toestromend basenrijk kwel- of grondwater (Bobbink et al., 2017; O+BN, 2018). Droog zandlandschap is als gevolg van zijn ontstaanswijze veelal hooggelegen, waardoor er geen sprake is van toestromend grondwater (Figuur 4). Bovendien is in de droge binnenlandse zandgronden weinig tot geen kalk (calciet: $CaCO_3$) aanwezig: een stof die op snelle wijze zuur kan bufferen.



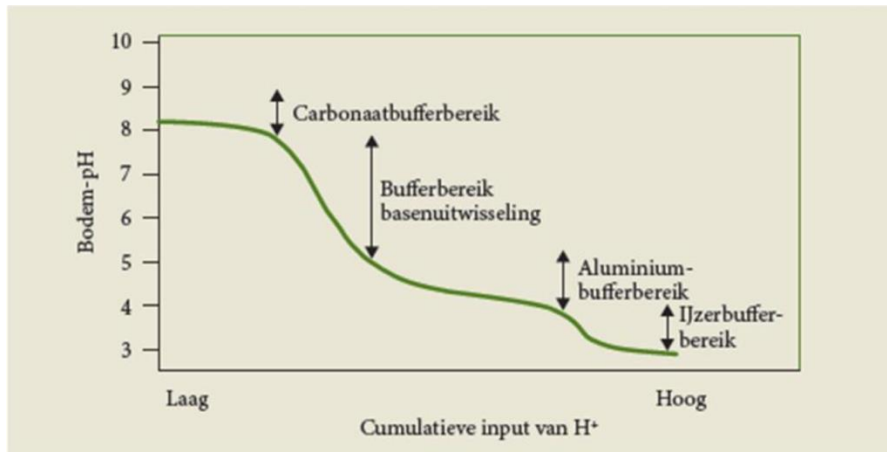
Figuur 4. Droog zandlandschap; te zien is dat het grondwater zich diep in de hoge zandgrond bevindt. (Naar: Oscar Langevoord, Website Natuurkennis, OB+N, 2018)

De bodem van het hoge, droge zandlandschap is voor de buffering van zuur allereerst afhankelijk van de kationenuitwisseling door het bodemadsorptiecomplex (het geheel aan adsorberende oppervlakken in de bodem, Locher & de Bakker, 1990). Dat complex bestaat uit negatief geladen kleimineralen of organische bestanddelen, waardoor basische kationen (zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ en Na^+) aan het complex geadsorbeerd kunnen zijn (Figuur 5). Wanneer er zuur (H^+) in de bodem komt, kunnen de H^+ -ionen de kationen van het complex verdringen, waardoor de kationen in de bodemoplossing terechtkomen (Bobbink et al., 2017). Aangezien de H^+ -ionen aan het complex geadsorbeerd zijn, zijn ze niet meer in oplossing. Daarom verandert de pH niet; men spreekt dan van een gebufferde bodem (Bobbink et al., 2017). De kationenuitwisseling verloopt snel, maar de capaciteit is beperkt; het bodemcomplex kan verzadigd raken met H^+ , waardoor uiteindelijk geen H^+ meer kan worden gebonden en de pH gaat dalen: er treedt bodemverzuring op.



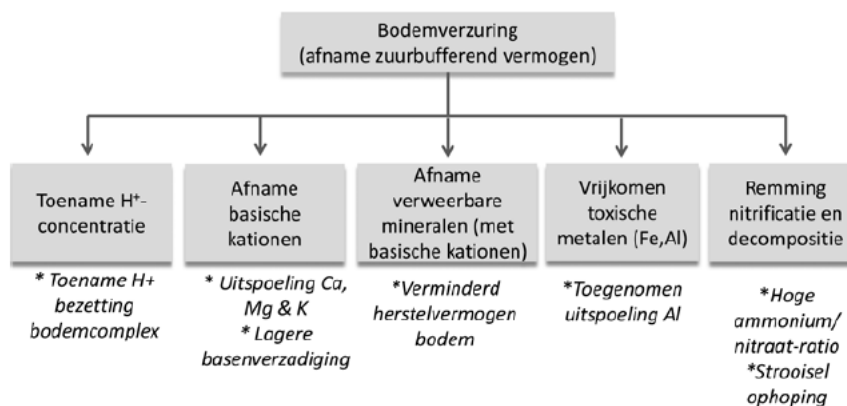
Figuur 5. Uitwisseling van stoffen tussen de bodem en plantenwortels. Rechts: een bodemdeeltje (soil particle); dit is negatief geladen en heeft daardoor diverse kationen (positief geladen ionen) aangetrokken, bijv.: K^+ en Ca^{2+} (Urry et al., 2017)

Ten tweede wordt het zuur in droge zandbodems geneutraliseerd door de verwerking van silicaatmineralen (Bergsma et al., 2016; Bobbink et al., 2017). Primaire silicaatmineralen worden afgebroken, waarbij zich (bij $\text{pH} > 4,5$) kleimineralen vormen (Bergsma et al., 2016). Het proces versnelt door extra toevoer van zuur (Bobbink et al., 2017). Dit mechanisme draagt normaalgesproken weinig bij aan de actuele buffering in de bodem, maar het speelt een belangrijke rol in het herstel van de buffercapaciteit via kationuitwisseling, door het 'opladen' van het adsorptiecomplex met basische kationen (Bergsma et al., 2016; Bobbink et al., 2017). Beneden een pH van 4,5 kan de verwerking van silicaatmineralen niet meer plaatsvinden, maar wordt vrij Al^{3+} gevormd. Ook Al^{3+} kan gebonden worden aan het bodemcomplex, maar dat verhindert de toename van Al^{3+} niet. Al^{3+} is toxisch voor veel planten- en diersoorten (Bobbink et al., 2014; de Vries, 2008). Bij zeer lage pH-waarden ($< 3,0$) spelen ijzerverbindingen een dominerende rol bij de bodembuffering en kan er veel Fe^{3+} in oplossing komen (Figuur 6). Dat is toxisch voor veel planten (Bobbink et al., 2014; de Vries, 2008).



Figuur 6. Bij cumulatieve input van H^+ -ionen in de bodemoplossing is sprake van verzuring. De bodem is gebufferd tegen deze toename van H^+ doordat de zuren worden uitgewisseld tegen andere positief geladen ionen. Bij een hoge pH is er sprake van carbonaatbuffering. Als de pH daalt vindt buffering plaats door basenuitwisseling (positief geladen ionen, zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} en K^+) en als die voorraad uitgeput raakt, daalt de pH en zal achtereenvolgens buffering met aluminium en ijzer plaatsvinden. Dit proces verloopt sprongsgewijs (Den Ouden, 2015).

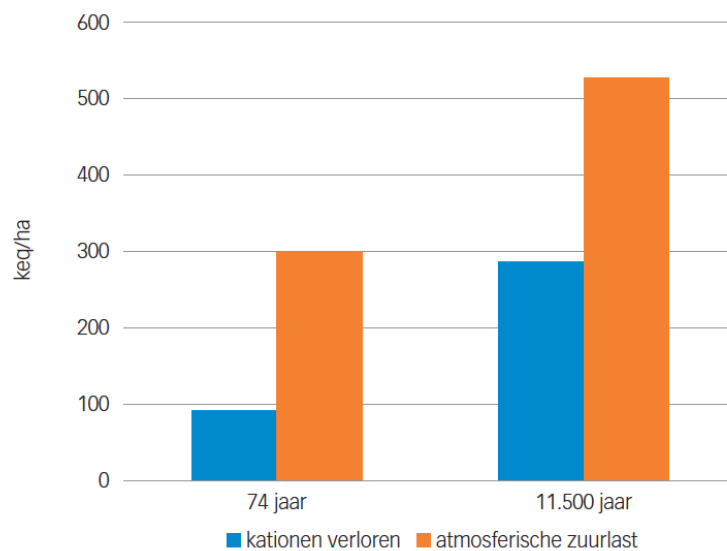
Bij bodemverzuring neemt de buffercapaciteit af, omdat steeds meer zuur gebonden moet worden. Bovendien neemt de pH af, omdat de bodem niet in staat is om alle zuur (H^+) te bufferen. Bij de kationenomwisseling worden basische kationen uit de bodem (zoals Ca^{2+}) verdrongen door zuren. De basische kationen komen daarbij vrij in het bodemvocht (Bobbink et al., 2017; de Vries, 2008). Aangezien in Nederland sprake is van een neerslagoverschot en er in droog zandlandschap een verticale waterbeweging is, kunnen de kationen uitspoelen naar diepere lagen of naar het grondwater (Bobbink et al., 2017; de Vries, 2008). De kationen zijn door de uitspoeling onbereikbaar voor bodemdieren en wortels van planten en bomen, de pH daalt en er komen toxische metalen, zoals Al^{3+} vrij (Bobbink et al., 2014). Bovendien kan door de daling van pH (<4,5) de nitrificatie afremmen, waardoor ammonium (NH_4^+) de dominante vorm van stikstof in de bodem wordt (Bobbink et al., 2017). De meeste planten- en diersoorten kunnen de combinatie van lage pH en hoge concentraties Al^{3+} en NH_4^+ niet verdragen, waardoor verzuring bijna altijd leidt tot een afname in biodiversiteit (Bobbink et al., 2014). Tenslotte kan ook de afbraaksnelheid van organisch materiaal sterk verminderen, waardoor strooiselophoping optreedt. In droog zandlandschap domineren boomsoorten met moeilijk afbreekbaar strooisel, zoals zomereik (*Quercus robur*), beuk (*Fagus sylvatica*) en grove den (*Pinus sylvestris*). Hierdoor vindt stapeling van strooisel plaats en ontstaan dikke, zure strooiselpakketten. De zuurproductie die hierbij vrij komt, leidt tot verdere uitspoeling van basische kationen uit de bodem (Bobbink et al., 2017). Figuur 7 toont een overzicht van het gehele proces.



Figuur 7. Overzicht van factoren die in de bodem veranderen bij voortschrijdende bodemverzuring (Bobbink et al., 2017).

1.2.4 De oorzaken van bodemverzuring in Nederland

Bodemvormende processen als mineraalverwerking en podzolering zorgen voor het afbreken, verdwijnen en verplaatsen van mineralen in de bodem. In een natuurlijke situatie vinden deze processen plaats over perioden van duizenden jaren. Bergsma et al. (2016) hebben een plek op de Veluwe gevonden waar in de Tweede Wereldoorlog een spoorlijn is aangelegd, waarvoor een grote hoeveelheid zand werd afgegraven. De bodem van de kuil die daardoor ontstond is te beschouwen als een nieuwe bodem, waarvan de verwerking 74 jaar geleden is begonnen. In het omliggende gebied is de verwerking minimaal 11.500 jaar geleden begonnen. De onderzoekers hebben geconstateerd dat de jonge bodem, ondanks zijn leeftijd, in vergelijking met de oude bodem al flink verweerd is. Hieruit blijkt dat de antropogeen versnelde verwerking van de afgelopen 74 jaar, overeenkomt met 8500 jaar natuurlijke verwerking. Uit hetzelfde onderzoek blijkt dat de zuurlast in de afgelopen 74 jaar extreem hoog is geweest: er is meer zuur op de bodem neergekomen dan er aan basische kationen is verdwenen (Figuur 8). Daarom concluderen de auteurs dat door verzuring het neutraliserende, nutriëntenleverende en zelfherstellend vermogen van de bodem in relatief korte tijd ernstig is aangetast.

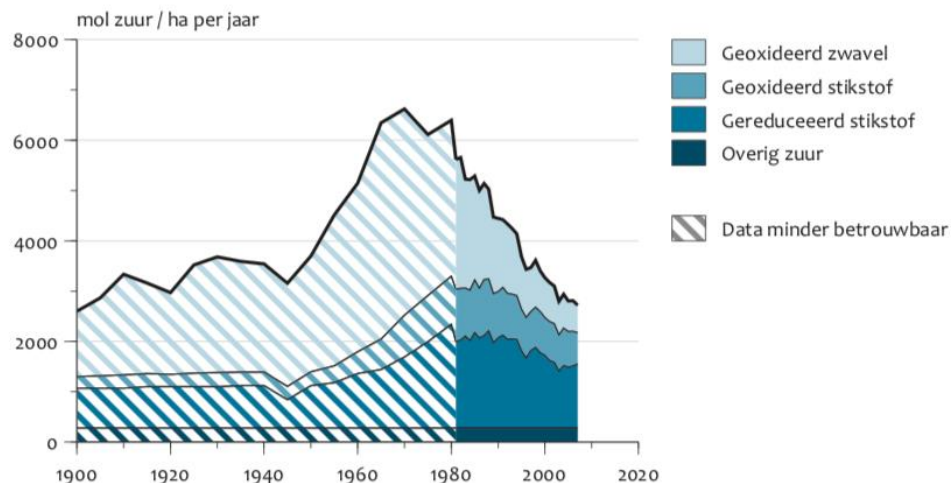


Figuur 8. Berekend totaalverlies aan kationen uit de bovenste 30 cm van de bodem uit de fijne (<221 micrometer) fractie vergeleken met de totale geschatte atmosferische zuur input gedurende de leeftijd van de bodem (Bergsma et al., 2016)

De eerste inzichten in de verbanden tussen luchtverontreiniging en verzuring van ecosystemen zijn afkomstig van de Zweedse wetenschapper Odén die in 1967 rapporteerde over een ernstige afname van de visstand in meren in zuidwest Zweden die hij toeschreef aan zure regen als gevolg van luchtverontreiniging. Vanaf dat moment is er wetenschappelijk onderzoek gedaan naar luchtverontreiniging en de effecten daarvan op de natuur. Zo ontdekte men dat het niet alleen om de toevoer van zure stoffen door neerslag ging, maar dat er ook sprake is van directe toevoer vanuit de atmosfeer naar het aardoppervlak: droge depositie (Van den Burg, 1983). Vanaf dat moment geeft men de voorkeur aan de term 'verzurende depositie' boven 'zure regen'. Ook ontdekte men dat zwaveldioxide en stikstofoxiden een grote bijdrage leveren aan de zure depositie (Van den Burg, 1983) en dat de Nederlandse bosbodems ernstig waren verzuurd, de hoeveelheid opgelost aluminium verhoogd en de hoeveelheid calcium verlaagd was (Manuel et al., 1984).

Kolen, die tot in de jaren zestig gebruikt werden als belangrijkste bron voor de verwarming van huizen, waren nog voordat preventief beleid kon worden ingezet, vervangen door aardgas. Daarmee is de emissie van zwaveldioxide in Nederland sinds 1965 sterk afgenomen (Figuur 9) (Buijsman et al., 2010). Emissies van stikstofoxiden bleken echter lastiger te reduceren (Buijsman et al., 2010). De introductie van de driewegkatalysator bij personenauto's aan het eind van de jaren tachtig, leverde wel een

stevige bijdrage aan de emissieverlaging. In West-Europa is sindsdien de emissie van stikstofoxiden met 30% gedaald en in Nederland zelfs met 40% (Buijsman et al., 2010), ondanks de volumegroei van het verkeer. De emissies van ammoniak bleken het moeilijkste omlaag te brengen. Deze waren in 2012 voor zeker 82% afkomstig uit agrarische activiteiten (RIVM, 2012). Sinds 1980 is de emissie van ammoniak in Nederland gehalveerd. In West-Europa bedroeg de reductie 10% (Buijsman et al., 2010). De depositie van ammoniak per hectare in Nederland is echter nog steeds de hoogste van heel Europa (Buijsman et al., 2010).



Figuur 9. Verzurende depositie van 1900-2007 (Buijsman et al., 2010)

Naast verzurende depositie kan ook het historisch gebruik van bossen en hun bodems in Nederland een rol spelen in het ontstaan van calciumdeficiëntie in de Nederlandse bossen op zandgronden. Een voorbeeld hiervan betreft het effect van de oogst van bomen op de nutriëntenbalans van het bos; hout en biomassa worden hierbij uit het bos gehaald, maar daar komen geen voedingsstoffen voor terug. Dat geldt te meer voor de oogst van tak- en tophout, omdat deze delen van de boom de meeste nutriënten bevatten (de Jong et al., 2017). Juist voor de oogst van tak- en tophout is de afgelopen jaren een markt ontstaan, vanwege de toepassing als brandstof (de Jong et al., 2017). Andere historische gebeurtenissen die de nutriëntenbalans van de bodems in Nederland hebben beïnvloed, zijn bijvoorbeeld de ontginning ten behoeve van potstalbemesting en de werkverschaffingsprojecten (Siepel et al., 2009), waarbij bos werd aangeplant, de bodem werd bewerkt en soms zelfs bemest (Van den Burg, 1991).

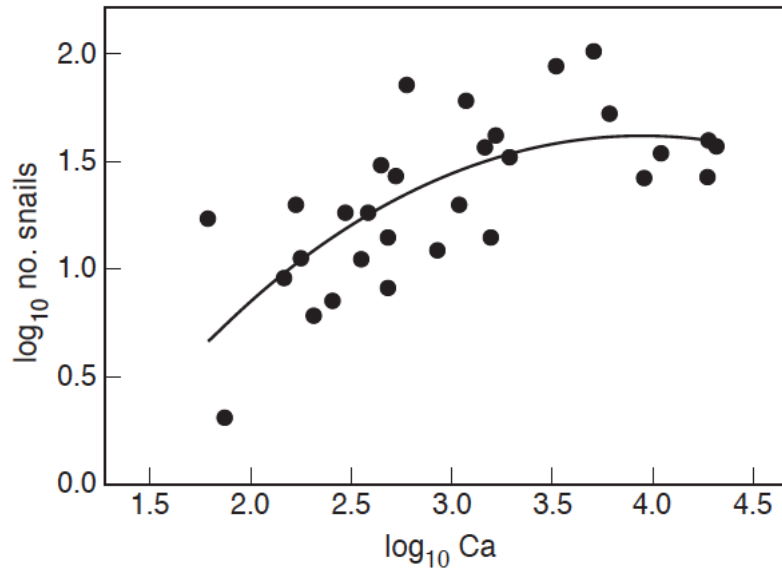
Terwijl veel mensen als gevolg van de afgenomen media-aandacht dachten dat het ‘zure regen’-probleem inmiddels wel is opgelost, deed Olsthoorn in 2005 al een belangrijke constatering: *“Het lijkt wel alsof verzuring niet meer bestaat, maar dat is helemaal niet zo. Verzuring is cumulatief”* (Olsthoorn, 2005). Kortom: de bodem die was aangetast door zure regen in de jaren tachtig en negentig, is in de periode daarna niet of nauwelijks hersteld, terwijl de zure depositie gestaag voortging. Wel is het tempo van de verzuring vertraagd door de depositiedaling die in de laatste decennia heeft plaatsgevonden (Buijsman et al., 2010). Modelberekeningen wijzen uit dat de uitputting van de buffercapaciteit van bosbodems als gevolg van de depositiedaling met 150-400 jaar is uitgesteld (Buijsman et al., 2010). Veranderingen in het voorkomen van gevoelige soorten laten zien dat de condities nog steeds niet op orde zijn (Buijsman et al., 2010), zoals in 1996 al voorspeld door Graveland (Graveland, 1996b). Mogelijk slaat de uitputting van de bodem eerder toe dan men verwacht; zeker op verzuringgevoelige bodems, zoals voedselarme zandgronden (Lucas et al., 2011; Tian & Niu, 2015; Bergsma et al., 2016). Het is niet uitgesloten dat de waarnemingen van Van den Burg uit 2017, die wijzen op een calciumdeficiëntie bij broedvogels van bossen op voedselarme bodems, een uiting zijn van uitputting van de bodem en de gevolgen daarvan voor de voedselketen van het bos-ecosysteem.

1.2.5 Het verband tussen bodemverzuring en calciumdeficiëntie bij broedvogels

De eerste waarnemingen van calciumdeficiëntie bij in het wild levende broedvogels op de Veluwe zijn gedaan in de jaren '50 door L. Tinbergen (Dekhuijzen & Schuijl, 1996). De eerste aanwijzingen in de literatuur zijn óók afkomstig van de Veluwe: Drent en Woldendorp rapporteerden hierover in 1989 in het tijdschrift *Nature* (Drent & Woldendorp, 1989). Deze auteurs toonden met een langlopend onderzoek in het Buunderkampbos aan dat diverse broedvogels van bossen op arme, zure gronden in Nederland een toenemend aantal eieren produceerden zonder schaal of met schalen van zulke slechte kwaliteit dat het embryo indroogde tijdens de incubatie (Drent & Woldendorp, 1989). De problematiek werd aangetoond bij 57% van de standvogels van bossen op voedselarme gronden en bij 40% van de standvogels van bossen op relatief voedselrijke bodems. De auteurs zagen significant meer problemen in bossen op arme podzolbodems dan in bossen op klei of leem en concludeerden dat zure regen een belangrijke oorzaak is voor het uitspoelen van basische kationen, zoals Ca^{2+} , met als direct gevolg een calciumtekort op diverse trofische niveaus: in de bodem, in de bladeren van bomen, in rupsen en in eischalen. De auteurs zagen echter geen effecten op de populatietrends van holenbroeders en verklaarden dat vanuit de theorie dat aanwas vanuit rijkere, omliggende gebieden de afname in de arme bossen kan compenseren, conform de theorie over source-sink-dynamica van Pulliam uit 1988.

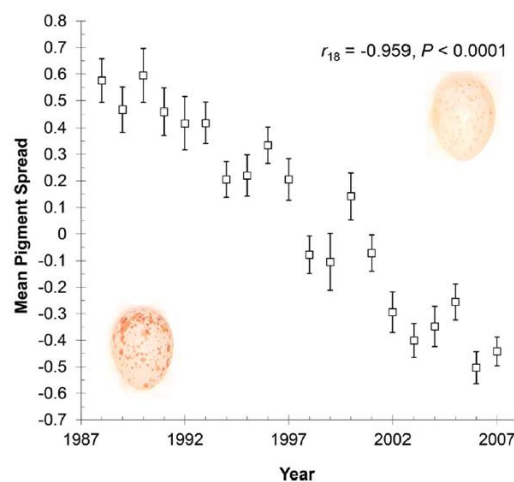
Graveland is in 1995 gepromoveerd op de effecten van verzuring en kalkgebrek op het broedsucces van zangvogels. Uit zijn onderzoek kwam naar voren dat de eierschaalproblematiek bij de koolmees van 10% in de periode van 1983-1984 was toegenomen naar 40% in de periode van 1988-1994 (Graveland et al., 1994). Daarnaast ontdekten Graveland et al. (1994) dat bij eierschaaldefecten, de vrouwelijke koolmees het nest in 48% van de gevallen verlaat, waar dat slechts 14% betreft bij vrouwelijke koolmezen met eieren zonder problemen. De auteurs concluderen in hun artikel dat het bodemtype gerelateerd is aan calciumdeficiëntie bij broedende koolmezen. Vergiftiging met chemische gewasbestrijdingsmiddelen op basis van organochloorverbindingen werd uitgesloten, omdat roofvogels, die aan de top van de voedselketen staan, niet leken te lijden onder hetzelfde probleem. Integendeel: de roofvogelstand was na het verbannen van DDT uit Nederland juist hersteld (Opdam et al., 1987).

Nadien hebben verschillende auteurs in Europa en Noord-Amerika geprobeerd om het onderzoek van Graveland te reproduceren, waarbij de bevindingen niet altijd met elkaar overeenkomen. Ramsay & Houston (1999) vonden met een vergelijkbaar onderzoek aan pimpelmezen in Schotland geen aanwijzingen voor calciumdeficiëntie. Tilgar et al. (1999) probeerden het bekalkingsexperiment van Graveland uit 1994 te reproduceren bij koolmezen en bonte vliegenvangers in Estland en dat leverde wel vergelijkbare resultaten op. Jubb et al. (2006) wisten in het Verenigd Koninkrijk aan te tonen dat koolmezen in calciumarme territoria eieren leggen met dunne eierschalen; de voornaamste oorzaak bleek een tekort aan slakken, die in lagere dichtheden voorkwamen op calciumarme bodems (Figuur 10).



Figuur 10. Relatie tussen het aantal slakken per plot en de hoeveelheid calcium in de bodem (beide loggetransformeerd). De regressie is sterk significant ($p < 0,0001$) (Jubb et al., 2006)

De meest recente internationale publicatie over calciumdeficiëntie bij broedvogels ten gevolge van bodemverzuring, is een artikel van Gosler & Wilkin (2017). Deze auteurs onderzochten of de dikte van de eierschaal van koolmezen correleert met de beschikbaarheid van calcium in de broedbiotoop. Dit deden zij aan de hand van de pigmentatie van eieren uit 2313 nesten in de periode 1988-2007 op een geologische gradiënt (basenarm – basenrijk). Uit dit onderzoek komt naar voren dat het bodemcalcium in de periode 1974-2008 is gedaald, vooral in calciumrijke gebieden. Tussen 1988 en 2007 heeft er een systematische verandering plaatsgevonden in de pigmentatie van eieren, wat wijst op een afname in dikte van de eierschaal van 6,5% (Figuur 11). De auteurs wijten de verandering aan het lekken van calcium uit kalkrijke bodems als gevolg van verzurende depositie. De belangrijkste conclusie van de auteurs is dat zij voor het eerst aantonen dat niet alleen problemen ontstaan in het broedsucces van koolmezen op calciumarme bodems, maar ook op calciumrijke bodems.



Figuur 11. Afname in gemiddelde ($\pm$ SD) pigmentatie van 2313 legsels van koolmezen ($n=55-202$ per jaar). Op basis van een schatting naar aanleiding van de regressie van schaaldikte op pigmentatie, representeert deze grafiek een afname in de schaaldikte van 6,53% tussen 1988 en 2007. De plaatjes van de eieren zijn representatief voor eieren die geassocieerd kunnen worden met bodems met hoge calciumgehalten (rechtsboven) en met bodems met lage calciumgehalten (linksonder) (Gosler & Wilkin, 2017)

De meest recente Nederlandse publicatie over calciumdeficiëntie bij broedvogels, is een artikel van Schuitemaker (2017) dat gepubliceerd is het jaarrapport van *NESTKAST* (Ballering, 2018). Schuitemaker vond op de Hoge Veluwe nabij Schaarsbergen geen toename in de symptomen van calciumdeficiëntie bij broedvogels op verzuringgevoelige haarpodzolgronden tussen 2008 en 2017. Halfweg bestudeerde een database met broedgegevens van de Buunderkamp over de periode van 1995-2009 en zag daarin ook geen gegevens meer die duiden op dunne eierschalen of veelvuldig nestfalen (persoonlijke informatie, W. Halfweg, 2018). Kortom: de effecten van bodemverzuring door stikstofdepositie op broedvogels van bossen op hoge zandgronden in Nederland zijn onduidelijk.

1.3 Relevantie van dit afstudeeronderzoek

1.3.1 Wetenschappelijke relevantie

Na het combineren van de inzichten uit bovenstaande probleemanalyse (paragraaf 1.2), lijkt het aannemelijk dat stikstofdepositie leidt tot bodemverzuring, waaruit vervolgens een calciumtekort in de voedselketen alsmede een afname in broedsucces kunnen voortkomen en mogelijk ook dalende populatietrends bij broedvogels. Dat zal naar verwachting allereerst blijken in gebieden op voedselarme zandgronden, die weinig buffercapaciteit hebben. Van den Burgs waarnemingen aan mezen in het Ginkelse bos uit 2017 passen bij dit beeld, maar de waarnemingen van Schuitemaker (2017) en Halfweg (persoonlijke informatie, W. Halfweg, 2018) juist niet. Op basis van wetenschappelijk onderzoek kan daarom nog niet worden bevestigd dat stikstofdepositie in Nederland anno 2018 op grotere schaal leidt tot een verminderd broedsucces of afname in populatietrends van broedvogels.

1.3.2 Politieke en maatschappelijke relevantie

Uit de aandacht in media en de Tweede Kamer (zie citaat bovenaan inleiding) blijkt dat het onderwerp politiek en maatschappelijk relevant is. Inzicht in ernst en omvang van de effecten van bodemverzuring door stikstofdepositie op broedvogels kan aanleiding zijn tot aanpassing van beheer en beleid, zodat de instandhouding van duurzame ecosystemen voor de toekomst gegarandeerd is. Een lokaal tekort aan calcium of andere micronutriënten dat leidt tot een afname van broedsucces en/of populatieomvang van broedvogels, zou bijvoorbeeld kunnen worden opgelost door het bekalken van de bodem (wat ook nadelen kent, zoals beschreven door Siepel et al. (2009)) of het aanbieden van grit of lege eierschalen van kippen om broedvogels tijdelijk te ondersteunen (Graveland & Berends, 1997). Echter, als het probleem op grotere schaal speelt en leidt tot een landelijke afname van het broedsucces en populatietrends, dan is een meer integrale benadering op zijn plaats, waarbij de landelijke of regionale reductie van stikstofdepositie meer prioriteit krijgt.

1.3.3 Relevantie voor de opdrachtgevers (Sovon en Radboud Universiteit)

Sovon Vogelonderzoek Nederland (hierna te noemen: Sovon) omschrijft zichzelf als *'een non-profit organisatie die het voorkomen en de ontwikkeling van Nederlandse vogels bijhoudt'* ("Over Sovon", 2017). Daarbij wordt gekeken naar de toe- of afname van vogels en naar de redenen daarvan. De resultaten van het onderzoek dat Sovon doet, vormen een basis voor het natuurbeheer en -beleid in Nederland. Sovon werkt samen met onderzoekers van de vakgroep dierecologie van de Radboud Universiteit in Nijmegen. Zij willen naar aanleiding van de bevindingen van Van den Burg (2017) uit het Ginkelse Bos in kaart brengen of het een lokaal probleem betreft of dat er sprake is van een grotere, nationale of regionale bedreiging voor broedvogels van bossen op verzuringgevoelige bodems in Nederland.

1.4 Doelstelling

Het primaire doel van dit afstudeeronderzoek is: bepalen of er verschillen zijn in populatietrends en broedsucces van bosvogels op hoge zandgronden met verschillende verzuringgevoeligheid en stikstofbelasting.

Het secundaire doel van dit afstudeeronderzoek is: evalueren of de bevindingen van Van den Burg (2017) uit het Ginkelse Bos op grotere ruimtelijke schaal spelen in Nederland en of ze relevant zijn voor meerdere vogelsoorten van bossen op hoge zandgronden.

Dit onderzoek heeft nadrukkelijk niet tot doel om een causaal verband aan te tonen. Onder andere uit een review van Nijssen et al. (2017) blijkt dat er vaak vele ecologische interacties onderliggend zijn aan het ontstaan van problemen in een voedselketen als gevolg van stikstofdepositie. Het is moeilijk om bepaalde oorzakelijke factoren geïsoleerd te onderzoeken en om op die manier causale verbanden te kunnen leggen; daarvoor zijn lab- en veldexperimenten nodig (Nijssen et al. 2017). De uitkomst van dit onderzoek kan wellicht een aanzet zijn voor het initiëren van lab- en/of veldexperimenten.

1.5 Vraagstelling

Wat is het verband tussen populatietrends en broedsucces van bosvogels op hoge zandgronden die verschillen in stikstofdepositie en verzuringgevoeligheid?

Deelvragen:

1. Wat zijn de lokale populatietrends van broedvogels van bossen op meer en minder verzuringgevoelige zandgronden?
2. Wat zijn de lokale trends in broedsucces van broedvogels van bossen op meer en minder verzuringgevoelige zandgronden?
3. Wat is het verband tussen de bij deelvraag 1 en 2 gevonden trends en de ruimtelijke variatie in stikstofdepositie?

2. Methode

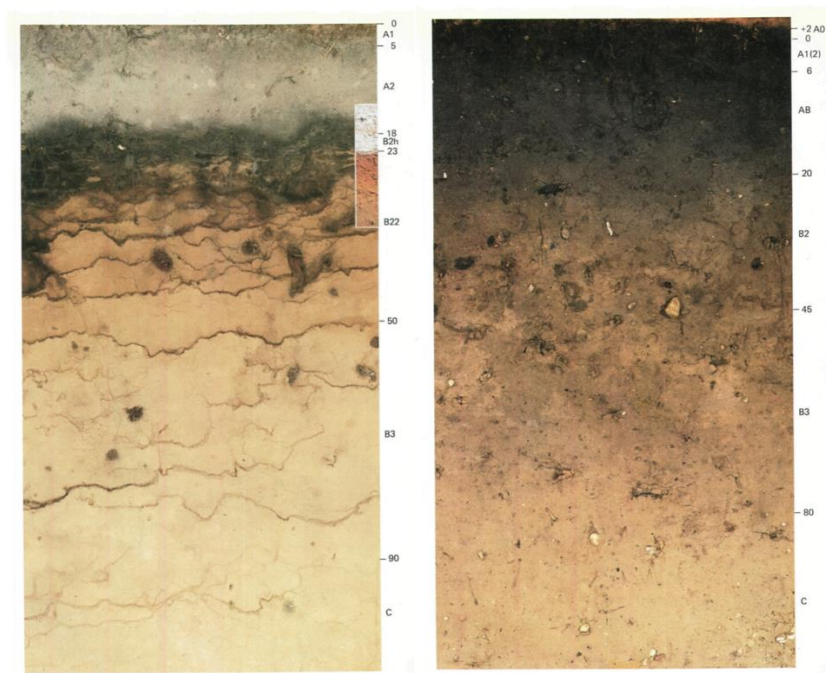
2.1 Het onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied is gelegen op hoge zandgronden in Nederland (bijlage 1 toont hiervan een overzicht). Immers: de zandbodems leken in voorgaand onderzoek de locatie waar bodemverzuring zich openbaarde in de vorm van calciumdeficiëntie bij broedvogels. Om een zuivere vergelijking te kunnen maken tussen populatietrends van bosvogels op meer en minder verzuringgevoelige hoge zandgronden, werden selectiecriteria opgesteld voor de bodemtypen. De inclusiecriteria zijn: moedermateriaal bestaat uit zand, bodemtype is landschappelijk hoog gelegen. De exclusiecriteria staan, gepaard gaande met argumentatie en voorbeelden in tabel 2.

Tabel 2. Exclusiecriteria zandgronden

Criterium	Argument	Voorbeeld
Bufferend vermogen niet af te lezen van bodemkaart	Bij stuifzandgronden is het bufferend vermogen afhankelijk van het moedermateriaal (bijv. arme Eridanossedimenten versus rijkere Rijnsedimenten), maar de verschillen in moedermateriaal zijn niet gekarteerd.	Vlakvaaggronden (Zn)
Aanwezigheid moerige lagen of minerale eedlagen in of op de zandgronden	Moerige lagen en eedlagen bestaan voor een groot deel uit organisch materiaal. Dit materiaal kan het bufferend vermogen van een bodem sterk beïnvloeden.	Moerige podzolgronden (Wp)
(Periodieke) aanwezigheid van grondwater in de bodem	De (periodieke) aanwezigheid van grondwater kan voor de toevoer van bufferende mineralen zorgen in de bodem. Deze gronden zijn meestal ook niet hoog gelegen.	Veldpodzolgronden (Hn)
Aanwezigheid van een hoog leemgehalte in de bodem	Leem bevat kleinere bodemdeeltjes dan zand. Hoe meer kleine bodemdeeltjes, hoe groter het oppervlak waarmee de bodem mineralen kan bufferen. Daarom zijn leemrijke bodems beter gebufferde bodems.	Zandbrikgronden (BZ)
Aanwezigheid van fijn zand in de bodem	Zie bij hoog leemgehalte.	Fijnzandige haarpodzolgronden (Hd21)

Na toepassing van de selectiecriteria bleven twee bodems over die zuiver met elkaar te vergelijken zijn: grofzandige haar- en holtpodzolbodems. De bodems waar de meeste effecten van verzuring worden verwacht betreffen de grofzandige haarpodzolgronden, gecodeerd als Hd30 op de bodemkaart van Nederland. In Nederland is circa 40.000 hectare van de bodem gekarteerd als grofzandige haarpodzolgronden. Deze bodems hebben volgens Jongmans et al. (2013) en Ten Cate (1995) de volgende eigenschappen: ze bestaan uit grof (>210 micrometer), leemarm zand waarin podzolering heeft plaatsgevonden; ze zijn hoog gelegen op goed gedraineerde landschappelijke posities en kennen daardoor een netto neergaande waterbeweging en het moedermateriaal is extreem arm (bestaande uit arme Eridanossedimenten), waardoor zich oplosbare organische zuren vormen. De bodems kennen een dunne humushoudende bovengrond van 0-30 cm met amorfe humus; een uitgesproken grijze uitspoelingshorizont met daaronder een zwarte met toenemende diepte bruine inspoelingshorizont waarin nieuwgevormd, bruin gekleurd (amorf) ijzer als dunne huidjes rond de zandkorrels zit (Figuur 12). De oplosbare organische zuren leiden tot een vegetatie van naaldbomen en heide, die moeilijk afbreekbaar strooisel produceert dat nauwelijks met de minerale bodem wordt gemengd. De inspoeling van amorfe organische stof zorgt voor een verstopping in de nauwe ruimten tussen zandkorrels. Daarom kunnen bomen in goed ontwikkelde monomorfe inspoelingshorizonten niet goed wortelen en vormt zich boven de inspoelingshorizonten een wortelmat.



Figuur 12. Profielfoto's van een haarpodzolgrond (links, Hd30) en een bruine bosgrond (rechts, Y30) (foto's afkomstig uit: De Bakker & Edelman-Vlam, 1976)

De minder verzuringgevoelige - maar verder goed met haarpodzolgronden vergelijkbare - hoge zandgronden betreffen grofzandige holtpodzolgronden, gecodeerd als Y30 op de bodemkaart van Nederland. In Nederland is er circa 40.000 hectare van de bodem gekarteerd als grofzandige holtpodzolgrond. De naamgeving van deze bodems is onjuist, omdat onterecht wordt gesuggereerd dat het proces van podzolering van toepassing is op deze bodem. Men geeft daarom de voorkeur aan 'bruine bosgronden', omdat die term de profielopbouw beter weergeeft (Jongmans et al., 2013). Deze bodems hebben volgens Jongmans et al. (2013) en Ten Cate (1995) de volgende eigenschappen: ze bestaan uit grof (>210 micrometer) zand, maar hebben in tegenstelling tot haarpodzolgronden mineralogisch gevarieerd moedermateriaal met meer kleine deeltjes, meer nutriënten en een betere capaciteit voor het vasthouden van vocht (deze bodems bestaan uit rijke Rijnsedimenten). Biologische homogenisatie zorgt in deze bodems voor de vorming van een permanent, heterogeen en doorlopend poriënstelsel, waardoor loofbos diep en intensief kan wortelen. Daardoor is er sprake van een kringloop in voedingsstoffen; voedingsstoffen die dreigen uit te spoelen worden door het wortelstelsel weer opgevangen en in de kringloop gebracht. Hierbij worden geen oplosbare humuszuren gevormd en daarom vindt er geen podzolering plaats. De bodems hebben een karakteristieke helder oranjebruine kleur als gevolg van de ijzerhuidjes rond de zandkorrels (Figuur 12). De humusvorm is moder.

De ligging van de beide bodemtypen is in kaart gebracht met behulp van ArcMap (ESRI versie 10.5.1) en de bodemkaart van Nederland (1991) op schaal 1:50.000. Het resultaat hiervan is te zien in bijlage 2 en 3. Omwille van de leesbaarheid worden de verzuringgevoelige haarpodzolgronden met hun bodemkaartcode Hd30 weergegeven in de navolgende tekst. Dat geldt ook voor de minder verzuringgevoelige bruine bosbodems die met code Y30 worden weergegeven.

2.2 Materiaal

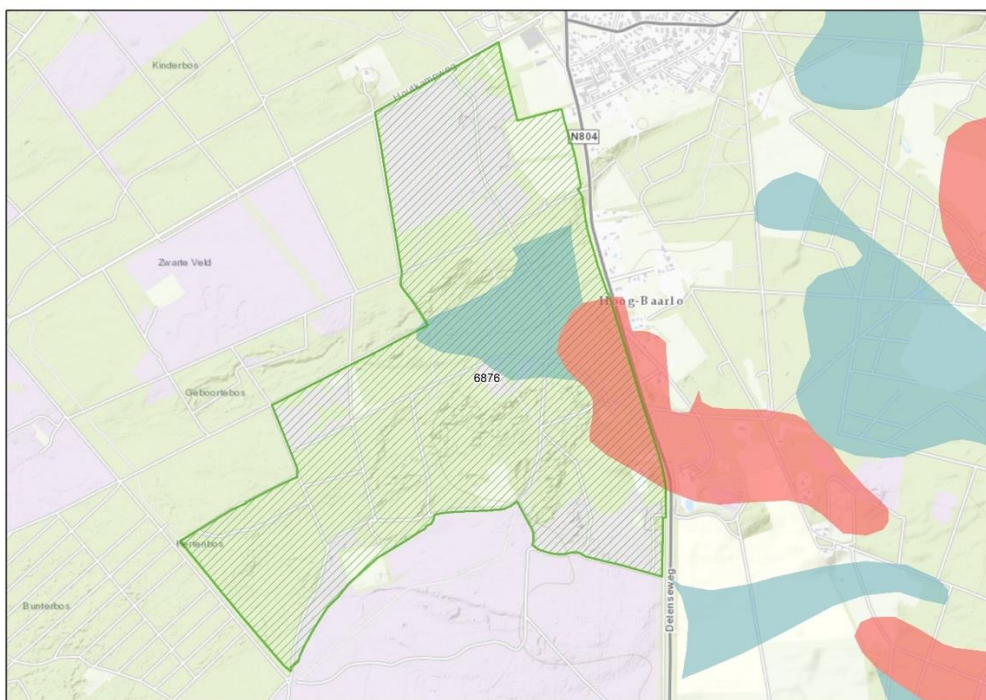
De koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger zijn geselecteerd als belangrijkste soorten, om de bevindingen van dit afstudeeronderzoek met eerder onderzoek naar calciumdeficiëntie bij broedvogels op basis van bodemverzuring te kunnen vergelijken. Deze soorten stonden in eerder onderzoek vaak centraal, omdat ze in holen broeden en daarom ook veel informatie over hun broedsucces bekend is (zie paragraaf 2.2.2). Om de trends in populatie en broedsucces van deze

soorten goed te kunnen bestuderen, is gekozen voor een onderzoeksperiode van 2000-2017. Volgens White (2017) is een periode van 15 tot 20 jaar voldoende lang om ecologische trends zichtbaar te maken en om keuzes voor beheer en beleid te kunnen baseren op gevonden resultaten.

2.2.1 Populatietrends van broedvogels op droge zandgronden

De populatietrends zijn gebaseerd op broedvogeltellingen die onderdeel zijn van het Broedvogelmonitoring-project (BMP-project) van Sovon dat al sinds 1984 loopt. Bij deze tellingen wordt een uitgebreide territoriumkartering gedaan in een vastomlijnd gebied (plot) volgens de methode zoals beschreven in de Handleiding Sovon broedvogelonderzoek BMP & kolonievogels (Vergeer et al., 2016). De inventarisatie richt zich op: alle soorten (BMP-A), zeldzame soorten (BMP-Z), bijzondere soorten (BMP-B), weide- en akkervogels (BMP-W) en/of roofvogels (BMP-R); voorheen was ook de inventarisatie van enkele soorten mogelijk (BMP-E). Omdat in dit onderzoek de algemene soorten, zoals mezen en de bonte vliegenvanger centraal staan, zijn de resultaten van BMP-A het meest interessant.

Op basis van de bodemtypenkaart van bijlage 2 en 3, heeft Sovon een Excel-bestand aangeleverd met aantalsgegevens van alle broedvogels die volgens het BPM-protocol geteld zijn op de twee bodemtypen (Hd30 en Y30) in de broedseizoenen van 2000 tot 2017. De ligging van deze BMP-plots is te zien in bijlage 4 en 5. Bij exploratie van deze gegevens bleek dat veel plots niet over de gehele periode van 2000 tot 2017 zijn geteld, waardoor de telreeksen niet volledig zijn. Ten tweede bleek dat in veel gevallen een plot op meer dan één bodemtype gelegen was en niet geheel op ofwel Hd30- ofwel Y30-bodem lag (zie voorbeeld in figuur 13).



Figuur 13. BMP-plot 6876: een telgebied waar volgens het BMP-A protocol is geteld. Hier bleek na het jaar 2000 slechts twee jaren (2013 en 2014) geteld te zijn. Verder bleek het gebied dat circa 148 ha groot is, voor 10% op Hd30 en voor 7% op Y30 te liggen.

Daarom is ervoor gekozen om alle plots in de analyse op te nemen, die voldeden aan de volgende criteria: (1) de plot bevatte minimaal twee teljaren, waarvan ten minste één teljaar voor en één teljaar na 2008 (midden van de telperiode); (2) de plot lag voor ten minste 50% op één specifiek bodemtype. Uiteindelijk bleven onder deze verruimde criteria slechts twee BMP-A-plots over op Hd30-bodems en 28 BMP-A-plots op Y30-bodems (Tabel 3).

Tabel 3. Aantal telgebieden (plots) op haarpodzolgronden en bruine bosgronden onder de verruimde criteria: geteld voor en na 2008, minimaal 50% binnen één bodemtype, alle habitattypen tezamen.

Bodemtype	Totaal aantal plots	BMP-A plots	BMP-B plots	BMP-E plots
Hd30	22	2	20	0
Y30	33	28	5	0

Verklaring van afkortingen: BMP-A = Broedvogelmonitoring-project Algemene soorten; BMP-B = Broedvogelmonitoring-project Bijzondere soorten; BMP-E = Broedvogelmonitoring-project Enkele soorten; Hd30 = haarpodzolgronden; Y30 = bruine bosgronden

Met slechts twee BMP-A plots op Hd30-bodems was er onvoldoende statistische power (voor toelichting, zie bijlage 7) voor een vergelijking van de populatietrends van broedvogels van bossen op Hd30- en Y30-bodems. BMP-B en BMP-E plots bevatten geen aantalsgegevens van de kernsoorten van dit onderzoek: mezen en bonte vliegenvangers. Dientengevolge kon aan de hand van deze dataset niet geanalyseerd worden wat de effecten zijn van stikstof op de populatietrends van broedvogels op beide bodemtypen. Om desalniettemin inzicht te krijgen in de populatietrends van koolmezen, pimpelmezen en bonte vliegenvangers op hoge zandgronden, zijn de door Sovon en het CBS gegenereerde trends van deze soorten op hoge zandgronden onderzocht. Deze gegevens konden niet verder worden uitgesplitst naar bodemtype en ze waren alleen beschikbaar voor de periode 1990 tot 2016 of 2007 tot 2016. Aangezien de periode 2007-2016 het beste overlapt met de vooraf gekozen periode van 2000-2017 (paragraaf 2.2), is gekozen voor het beschouwen van deze gegevens. Vervolgens zijn de regionale trends van midden en oost Nederland vergeleken met de landelijke trends van de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger op hoge zandgronden in Nederland. Deze trends hebben betrekking op de gemiddelde procentuele verandering per jaar.

2.2.2 Broedsucces op droge zandgronden

De gegevens over broedsucces op hoge zandgronden zijn gebaseerd op inventarisaties die onderdeel zijn van het Meetnet Nestkaarten van Sovon. Sovon werkt sinds 2008 samen met andere organisaties zoals het NIOO-KNAW en het Vogeltrekstation binnen het Netwerk voor Studies aan nestKASTbroeders (NESTKAST); sindsdien zijn meer gegevens beschikbaar. De methode waarmee de gegevens over broedsucces zijn verzameld, is in detail na te lezen in de Uitgebreide Handleiding Nestkaarten van Sovon (Bijlsma, 2011).

Op basis van de bodemtypenkaart (Bijlage 2 en 3), heeft Sovon een Excel-bestand aangeleverd met gegevens over het broedsucces van de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger, die gemonitord zijn op bodemtypen Hd30 en Y30, in de broedseizoenen van 2000 tot 2017. Om eventuele verschillen in populatietrends (paragraaf 2.2.1.) te verklaren vanuit broedsucces, zijn de gegevens over broedsucces uitgesplitst voor dezelfde fysisch geografische regio's als bij de populatietrends is gebeurd: Midden- en Zuid-Nederland (in Noord-Nederland liggen geen Hd30/Y30-bodems). Voor regio Midden bestaan de hoge zandgronden voor circa 25% uit de te onderzoeken bodemtypen (Hd30 en Y30). De ligging van de nestkasten is terug te vinden in bijlage 6. Aangezien de bodemtypen Hd30 en Y30 in regio Zuid slechts $\pm 1,5\%$ van het totale oppervlak van de hoge zandgronden beslaan, is ervoor gekozen deze regio niet op te nemen in de analyse.

2.2.3 Stikstofdepositie

Om een beeld te krijgen van de mate waarin verzuring en broedvogeltrends correleren, is het van belang om verzuring te kwantificeren. Dit is gedaan door gegevens over de verzuringgevoeligheid van de bodem (Hd30 versus Y30) met gegevens over de hoeveelheid stikstofdepositie te combineren. Om de ruimtelijke variatie van stikstof in kaart te brengen zijn de meest recente stikstofdepositiecijfers van het RIVM (2014) uit de Grootschalige Depositiekaarten van Nederland (GDN-kaarten) van AERIUS gehaald, omdat dit de enige openbaar beschikbare bron van informatie is over stikstofdepositie in Nederland. AERIUS is een rekeninstrument dat de overheid ontwikkelde in het kader van de Programmatische Aanpak Stikstofdepositie (Kenniscentrum Infomil, 2018). In dit systeem zijn meer

dan 1 miljoen stikstofbronnen verzameld voor alle sectoren in Nederland en buitenland die aan stikstofemissie bijdragen. AERIUS kan vervolgens de stikstofdepositie berekenen die een bron veroorzaakt op basis van gegevens over de bron, informatie over meteorologische condities, terreinruwheid en landgebruik (BIJ12, 2018). De onzekerheid in de berekende absolute waarden van de depositie ten behoeve van de GDN-kaarten (met resolutie 1x1 km) bedraagt 70%; dit betekent dat uit vergelijkingen is geconcludeerd dat de werkelijke depositie op een bepaalde plaats of gebied 70% hoger of lager kan zijn dan berekend (Metz, 2015). Middels RStudio (versie 1.0.136.0) zijn deze data aan de gebieden gekoppeld waarin de vogels zijn gemonitord.

2.3 Statistische analyse

2.3.1 Analyse van de populatietrends

Aangezien uiteindelijk de door Sovon en CBS gegenereerde gegevens gebruikt zijn in dit rapport om inzicht te krijgen in de populatietrends (zie paragraaf 2.2.1), was er geen statistische analyse van populatietrends nodig.

2.3.2 Analyse van het broedsucces

Om het verschil in broedsucces van koolmezen, pimpelmezen en bonte vliegenvangers op Hd30- en Y30-bodems te vergelijken, is gebruik gemaakt van één onafhankelijke variabele en twee afhankelijke variabelen, die elk met een verschillende methode zijn geanalyseerd (Tabel 4); hetgeen geleid heeft tot twee modellen per vogelsoort. In bijlage 8 wordt in detail uitgelegd op basis van welke argumenten voor logistische of lineaire regressieanalyse gekozen is.

Tabel 4. Modellen en variabelen voor de analyse van broedsucces en methode van analyse per model

Model	Onafhankelijke variabele	Afhankelijke variabele	Methode van analyse
1	Bodemtype Kenmerken: dichotome variabele (Hd30/Y30), binomiaal verdeeld	Aandeel succesvolle nesten Kenmerken: dichotome variabele (succes/geen succes), binomiaal verdeeld	Logistische regressieanalyse
2	Bodemtype Kenmerken: dichotome variabele (Hd30/Y30), binomiaal verdeeld	Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest* Kenmerken: discrete variabele (aantal jongen), binomiaal verdeeld	Lineaire regressieanalyse

* Bij deze analyse werden alleen de succesvolle nesten betrokken; hiervoor werd een selectie gemaakt van nesten met minimaal 1 uitgevlogen jong.

Voorafgaand aan de uitvoering van de analyses, werden de beschikbare data geëxploreerd volgens het protocol van Zuur et al. (2010); dit protocol is specifiek opgesteld voor het uitvoeren van statistische analyses op basis van ecologische gegevens. Het protocol heeft tot doel om fouten in de analyse te voorkomen. Indien aan alle voorwaarden uit dit protocol werd voldaan, is de analyse voortgezet. Niet-normaal verdeelde data werden zo nodig getransformeerd (bijvoorbeeld door de variabele te kwadrateren) om alsnog aan de voorwaarden uit het protocol te voldoen. Voor het exploreren en analyseren van de data is gebruik gemaakt van SPSS (versie 24). Grafieken hierbij zijn gemaakt met RStudio (versie 1.0.136.0). R is een open source softwarepakket dat werkt middels programmeertaal (scripts). Omdat R over de hele wereld gebruikt wordt, zijn er veel tools beschikbaar die aan het pakket kunnen worden toegevoegd om ingewikkelde analyses te vereenvoudigen. RStudio is een programma waarmee in een overzichtelijke omgeving gewerkt kan worden met R.

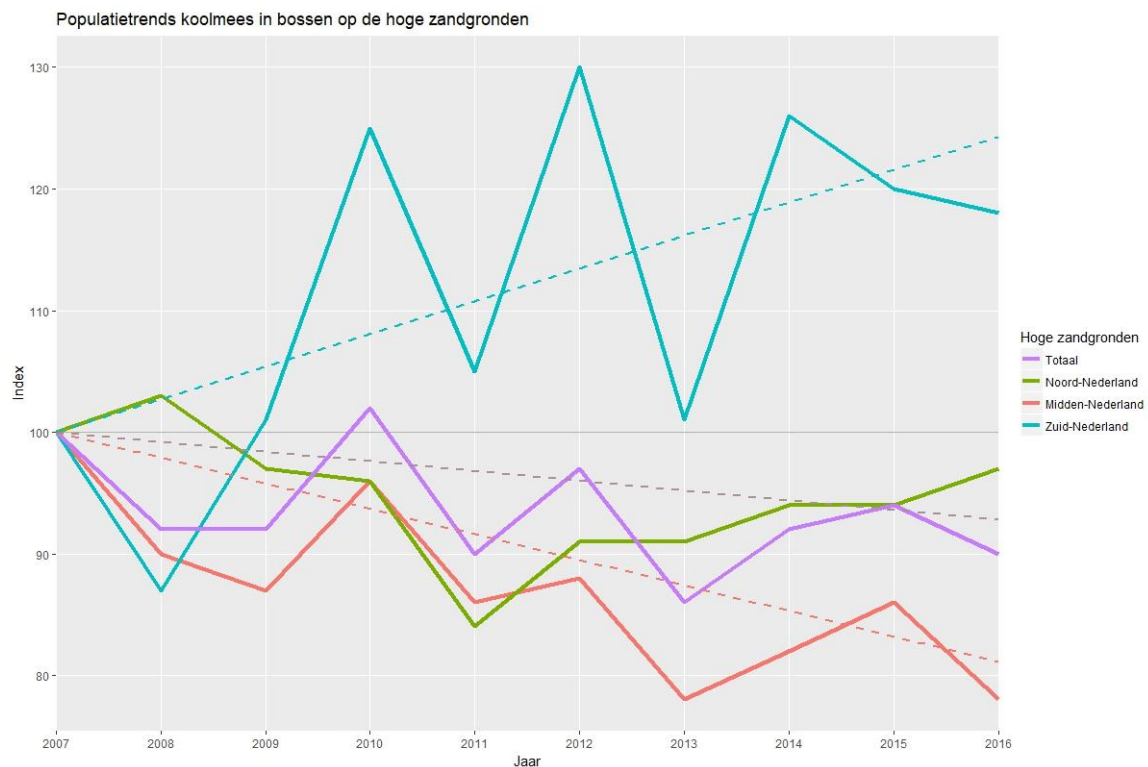
2.3.3 Analyse van de effecten van stikstofdepositie

Voor de analyse van de effecten van stikstofdepositie zijn de ruimtelijke gegevens gekoppeld aan de populatietrends en gegevens over broedsucces en stikstofdepositie in RStudio (versie 1.0.136.0). Om de effecten te analyseren is gebruik gemaakt van regressieanalyse met SPSS (versie 24).

3. Resultaten

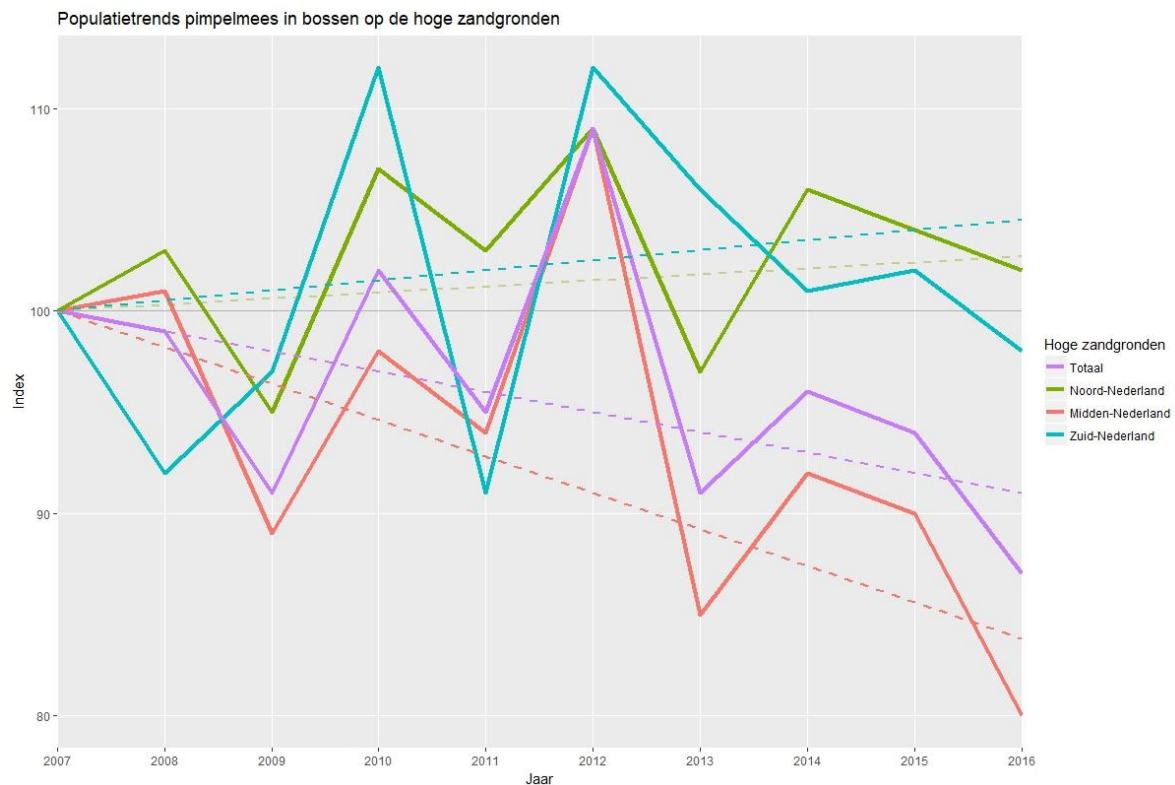
3.1 Populatietrends van broedvogels op hoge zandgronden

In figuur 14 zijn de populatietrends van de koolmees in de verschillende regio's weergegeven. De landelijke trend van koolmees op de hoge zandgronden laat een matige afname van 0,8% ($p < 0,05$) zien. In regio Midden (waar de Veluwe gelegen is) is een afname van 2,1% ($p < 0,01$) te zien. Van de drie onderzochte soorten is bij de koolmees het grootste verschil tussen de landelijke trend en de trend van regio Midden te zien. Opvallend is verder dat in regio Zuid een duidelijke toename van 2,7% ($p < 0,01$) te zien is.



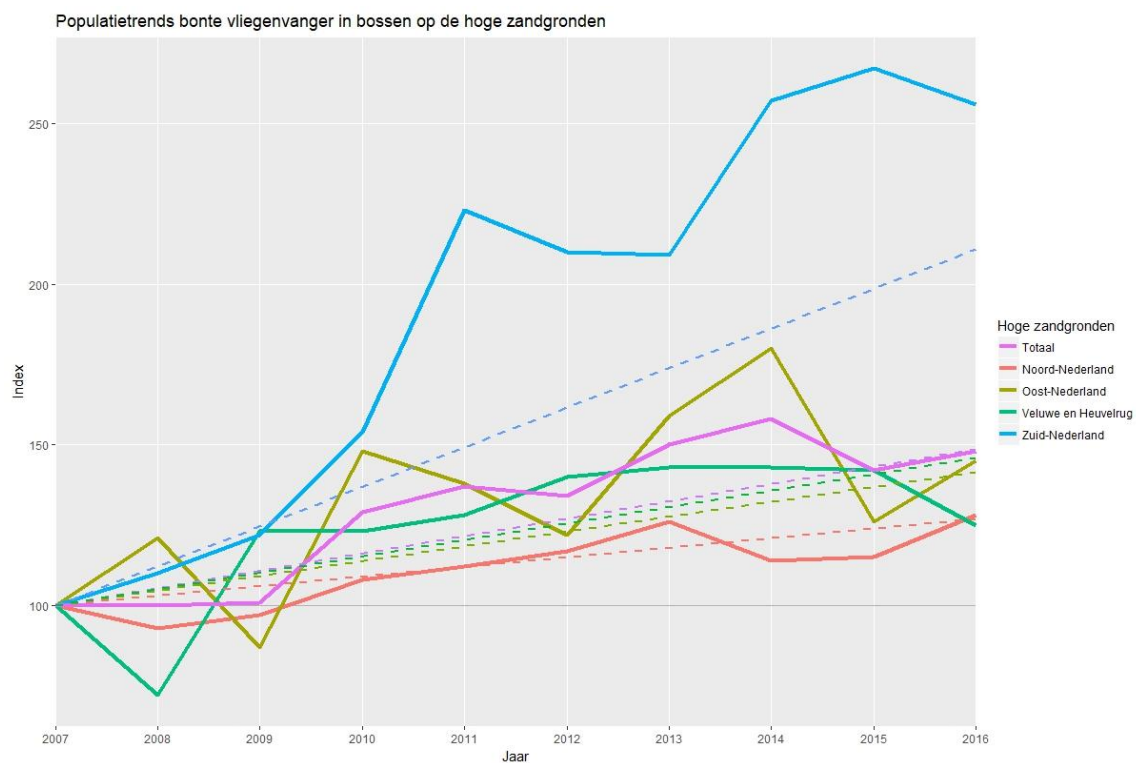
Figuur 14. Populatietrends van koolmees in bossen op de hoge zandgronden over de afgelopen tien jaar.

Figuur 15 toont dezelfde populatietrends voor de pimpelmees. De landelijke trend op de hoge zandgronden laat een matige afname van 1% ($p < 0,05$) zien en in regio Midden is de afname 1,8% ($p > 0,05$). Net als bij de koolmees is er in regio Midden de sterkste afname te zien. In de twee andere regio's is er een lichte toename te zien in de populatietrend van de pimpelmees.



Figuur 15. Populatietrends van de pimpelmees in bossen op de hoge zandgronden over de afgelopen tien jaar.

In figuur 16 zijn de populatietrends weergegeven voor de bonte vliegenvanger, waarbij de regio Midden verder opgesplitst is naar de regio Veluwe, regio Utrechtse heuvelrug en regio Oost. De trends van alle regio's laten een toename zien. Landelijk is dit een toename van 5,4% ($p < 0.01$). Op de Veluwe en Utrechtse heuvelrug is de toename 5,1% ($p < 0.01$) en in regio Oost is de toename 4,6% ($p < 0.01$).



Figuur 16. Populatietrends van de bonte vliegenvanger in bossen op de hoge zandgronden over de afgelopen tien jaar.

3.2 Trends in broedsucces op meer en minder verzuringgevoelige zandgronden

3.2.1 Het aandeel succesvolle nesten

Bijlage 9 toont een voorbeeld van de exploratie van de data van de koolmees volgens het protocol van Zuur et al. (2010). De data met betrekking tot de pimpelmees en de bonte vliegenvanger zijn op gelijksoortige wijze geëxploreerd. In tabel 5 is een overzicht te zien van het aantal gemonitorde nesten en de bijbehorende absolute, ongecorrigeerde kansen op succes voor de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger, uitgesplitst naar bodemtype voor de gehele periode van 2000-2017. Hierin is te zien dat de kans op een succesvol nest bij alle soorten hoger ligt op de verzuringgevoelige Hd30-bodem, dan op de minder verzuringgevoelige Y30-bodem.

Tabel 5. Aantal gemonitorde nesten van de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger

Soort	Bodemtype	Succes	Geen succes	Totaal	Kans op succesvol nest*
Koolmees	Hd30	406	139	545	74,50%
	Y30	839	314	1153	72,77%
		1245	453	1698	
Pimpelmees	Hd30	483	92	575	84,00%
	Y30	770	191	961	80,12%
		1253	283	1536	
Bonte vliegenv.	Hd30	106	24	130	81,54%
	Y30	143	40	183	78,14%
		249	64	313	

*Kans op succesvol nest is berekend door het percentage succesvolle nesten te bepalen ten opzichte van het totale aantal nesten.

Aandeel succesvolle nesten per bodemtype bij de koolmees

Logistische regressieanalyse werd uitgevoerd om te voorspellen wat het aandeel succesvolle nesten is op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten (bijv. weersomstandigheden die het broedsucces beïnvloeden, zoals neerslag en vorst). Een correctie voor habitat in deze analyse was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 6 toont de resultaten van deze analyse.

Tabel 6. Logistische regressieanalyse van aandeel succesvolle nesten van de koolmees

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt	Standard Error	Wald	p-waarde	Odds ratio
Bodemtype	-0,081	0,119	0,460	0,498	0,922
Jaar	0,077	0,014	29,793	0,000	1,080
Constante	-154,088	28,424	29,387	0,000	

De afhankelijke variabele in deze analyse is aandeel succesvolle nesten. 0 = niet succesvol en 1 = succesvol. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30.

Model $\chi^2 = 30,234$ $p < 0,001$

Pseudo R^2 (Nagelkerke) = 0,026

N = 1698

Uit deze gegevens kan worden opgemaakt dat bij een minder verzuringgevoelig bodemtype (Y30) het nestsucces afneemt ten opzichte van het verzuringgevoelige bodemtype (Hd30). De afname is te zien aan het min-teken bij de regressiecoëfficiënt en aan de odds ratio die onder de 1 ligt. De p-waarde bij het bodemtype is echter niet statistisch significant; de p-waarde bij de factor 'jaar' is wél statistisch significant. Dit betekent dat de trend in het aandeel succesvolle nesten van de koolmees wordt bepaald door de factor jaar: er is een statistisch significante toename in het aandeel succesvolle nesten van de koolmees op jaarbasis. Het bodemtype beïnvloedt deze trend niet.

Aandeel succesvolle nesten per bodemtype bij de pimpelmees

Logistische regressieanalyse werd uitgevoerd om te voorspellen wat het aandeel succesvolle nesten is op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten. Een correctie voor habitat in deze analyse

was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 7 toont de resultaten van deze analyse.

Tabel 7. Logistische regressieanalyse van aandeel succesvolle nesten van de pimpelmees

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt	Standard Error	Wald	P-waarde	Odds ratio
Bodemtype	-0,225	0,143	2,483	0,115	0,799
Jaar	-0,032	0,023	1,916	0,166	0,927
Constante	65,129	45,851	2,018	0,155	

De afhankelijke variabele in deze analyse is aandeel succesvolle nesten. 0 = niet succesvol en 1 = succesvol. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30.

Model $\chi^2 = 5,596$ $p > 0,05$

Pseudo R^2 (Nagelkerke) = 0,006

N = 1536

Omdat het gehele model niet statistisch significant is (zie p-waarde bij Model χ^2), kan op basis van deze analyse niet worden geconcludeerd dat er een verschil is in het aandeel succesvolle nesten van de pimpelmees op meer of minder verzuringgevoelige bodemtypen.

Aandeel succesvolle nesten bij de bonte vliegenvanger

Logistische regressieanalyse werd uitgevoerd om te voorspellen wat het aandeel succesvolle nesten is op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten. Een correctie voor habitat in deze analyse was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 8 toont de resultaten van deze analyse.

Tabel 8. Logistische regressieanalyse van aandeel succesvolle nesten van de bonte vliegenvanger

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt	Standard Error	Wald	P-waarde	Odds ratio
Bodemtype	-0,073	0,298	0,060	0,807	0,930
Jaar	0,114	0,033	11,813	0,001	1,121
Constante	-228,641	66,946	11,664	0,001	

De afhankelijke variabele in deze analyse is aandeel succesvolle nesten. 0 = niet succesvol en 1 = succesvol. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30.

Model $\chi^2 = 12,475$ $p < 0,01$

Pseudo R^2 (Nagelkerke) = 0,061

N = 313

Uit deze gegevens kan worden opgemaakt dat bij een minder verzuringgevoelig bodemtype (Y30) het nestsucces afneemt ten opzichte van het verzuringgevoelige bodemtype (Hd30). De afname is te zien aan het min-teken bij de regressiecoëfficiënt en aan de odds ratio die onder de 1 ligt. De p-waarde bij het bodemtype is echter niet statistisch significant; de p-waarde bij de factor 'jaar' is wél statistisch significant. Dit betekent dat de trend in het aandeel succesvolle nesten van de bonte vliegenvanger wordt bepaald door de factor jaar: er is een statistisch significante toename in het aandeel succesvolle nesten van de bonte vliegenvanger op jaarbasis. Het bodemtype beïnvloedt deze trend niet.

3.2.2 Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest

Bijlage 9 toont een voorbeeld van de exploratie van de data volgens het protocol van Zuur et al. (2010). Data die gebruikt werden om het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per bodemtype te onderzoeken bleken normaal verdeeld bij de koolmees en de pimpelmees. Bij de bonte vliegenvanger was sprake van een scheef-naar-linkse verdeling; deze data werden gekwadrateerd en konden daarna alsnog geanalyseerd worden. Als gevolg van het kwadrateren bevatten de regressieformules bij de bonte vliegenvanger een wortelteken om de uitkomsten terug te rekenen naar inzichtelijke waarden.

Tabel 9 toont een overzicht van het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per bodemtype en bijbehorende spreidingsmaten over de gehele periode (2000-2017). Hieruit blijkt dat het ongecorrigeerde gemiddelde aantal uitgevlogen jongen bij de koolmees en de bonte vliegenvanger iets lager ligt op minder verzuringgevoelige Y30-bodems dan op meer verzuringgevoelige Hd30-bodems. Bij de pimpelmees is het omgekeerde het geval: het ongecorrigeerde gemiddelde aantal uitgevlogen jongen ligt bij deze soort een heel klein beetje lager op Hd30-bodems dan op Y30-bodems.

Tabel 9. Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per nest $\pm$ standaarddeviatie, min-max en aantal per bodemtype, voor de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger over de gehele periode van 2000-2017

Soort	Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per nest, min-max en totaal aantal nesten op Hd30	Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per nest, min-max en totaal aantal nesten op Y30
Koolmees	7,113 $\pm$ 2,245 (1-13) n=399	6,73 $\pm$ 2,381 (1-16) n=819
Pimpelmees	8,55 $\pm$ 2,363 (1-15) n=475	8,62 $\pm$ 2,620 (1-15) n=771
Bonte vliegenvanger	5,83 $\pm$ 1,463 (1-9) n=103	5,37 $\pm$ 1,581 (1-8) n=771

Codering bodemtypen: Hd30 = 0; Y30 = 1

Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest bij de koolmees

Lineaire regressieanalyse werd uitgevoerd om te voorspellen wat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest is van de koolmees op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten. Een correctie voor habitat in deze analyse was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 10 toont deze analyse.

Tabel 10. Lineaire regressieanalyse van gemiddeld aantal jongen per succesvol nest bij de koolmees

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt*	Standard Error	t	P-waarde	95% betrouwbaarheidsinterval	
					ondergrens	bovengrens
Constante	8,105	0,265	30,580	0,001	7,585	8,625
Bodemtype	-0,347	0,142	-2,437	0,015	-0,626	-0,068
Jaar	-0,084	0,020	-4,112	0,001	-0,124	-0,044

De afhankelijke variabele in deze analyse is gemiddeld aantal jongen per succesvol nest. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30. De factor jaar is gecodeerd als 0 voor het jaar 2000; 17 voor het jaar 2017 etc.

*De getoonde regressiecoëfficiënt is niet gestandaardiseerd.

Model F (ANOVA) = 12,437 p <0,001

R² = 0,020

N = 1215

Uit de p-waarde van <0,001 bij dit model (zie Model F) kan worden geconcludeerd dat een regressievergelijking werd gevonden die statistisch significant is. Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest van de koolmees, kan voorspeld worden met de formule: 8,105 - 0,347 * Bodemtype - 0,084 * Jaar. Hieruit kan worden afgeleid dat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen van de koolmees op Y30-bodems statistisch significant lager ligt dan op Hd30-bodems, ook indien men corrigeert voor de jaareffecten.

Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest bij de pimpelmees

Lineaire regressieanalyse werd uitgevoerd om te voorspellen wat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest is van de pimpelmees op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten. Een correctie voor habitat in deze analyse was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 11 toont deze analyse.

Tabel 11. Lineaire regressieanalyse van gemiddeld aantal jongen per succesvol nest bij de pimpelmees

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt*	Standard Error	t	P-waarde	95% betrouwbaarheidsinterval	
					ondergrens	bovengrens
Constante	9,394	0,310	30,261	0,001	8,785	10,003
Bodemtype	0,169	0,151	1,123	0,262	-0,126	0,465
Jaar	-0,073	0,025	-2,945	0,003	-0,121	-0,024

De afhankelijke variabele in deze analyse is gemiddeld aantal jongen per succesvol nest. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30. De factor jaar is gecodeerd als 0 voor het jaar 2000; 17 voor het jaar 2017 etc.

*De getoonde regressiecoëfficiënt is niet gestandaardiseerd.

Model F (ANOVA) = 4,454 p < 0,05

R² = 0,007

N = 1242

Uit de p-waarde van <0,05 bij dit model (zie Model F) kan worden geconcludeerd dat een regressievergelijking werd gevonden die statistisch significant is. Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest van de pimpelmees, kan voorspeld worden met de formule: $9,394 + 0,169 * \text{Bodemtype} - 0,073 * \text{Jaar}$. Hieruit blijkt dat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen op Y30-bodems hoger ligt. Echter, de regressiecoëfficiënt voor het bodemtype is niet statistisch significant. Kortom: er is wel sprake van een statistisch significante jaarlijkse afname van het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen van de pimpelmees, maar dit verschilt niet significant per bodemtype.

Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest bij de bonte vliegenvanger

Lineaire regressieanalyse werd uitgevoerd op de gekwadeerde data om te voorspellen wat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest is van de bonte vliegenvanger op basis van bodemtype, gecorrigeerd voor jaareffecten. Een correctie voor habitat in deze analyse was niet zinvol, omdat vrijwel alle nesten gelegen zijn in dezelfde habitat: gemengde bossen. Tabel 12 toont deze analyse.

Tabel 12. Lineaire regressieanalyse van gemiddeld aantal jongen per succesvol nest bij de bonte vliegenvanger (Let op: de uitkomstvariabele 'gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest' is gekwadeerd).

Onafhankelijke variabele	Regressie-coëfficiënt*	Standard Error	t	P-waarde	95% betrouwbaarheidsinterval	
					ondergrens	bovengrens
Constante	39,165	3,539	11,203	0,001	32,670	46,612
Bodemtype	-4,799	1,949	-2,462	0,015	-8,639	-0,959
Jaar	-0,302	0,279	-1,080	0,281	-0,852	0,249

De afhankelijke variabele in deze analyse is gemiddeld aantal jongen per succesvol nest. De onafhankelijke variabele in deze analyse is bodemtype. 0 = Hd30 en 1 = Y30. De factor jaar is gecodeerd als 0 voor het jaar 2000; 17 voor het jaar 2017 etc.

*De getoonde regressiecoëfficiënt is niet gestandaardiseerd.

Model F (ANOVA) = 3,643 p < 0,05

R² = 0,030

N = 237

Uit de p-waarde van <0,05 bij dit model (zie Model F) kan worden geconcludeerd dat een regressievergelijking werd gevonden die statistisch significant is. Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest van de bonte vliegenvanger, kan voorspeld worden met de formule: $\sqrt{39,641} - 4,799 * \text{Bodemtype} - 0,302 * \text{Jaar}$. Hieruit kan worden afgeleid dat het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen van de bonte vliegenvanger op Y30-bodems statistisch significant lager ligt dan op Hd30-bodems, ook indien men corrigeert voor de jaareffecten.

3.3 Het verband tussen de gevonden trends en stikstofdepositie

Waar aanvankelijk de bedoeling van dit afstudeeronderzoek was om ook stikstofdepositie op te nemen in de modellen en vervolgens te berekenen of er een correlatie is tussen de stikstofdepositie en de

ontwikkelingen in aantallen en broedsuccessen op de Hd30- en Y30-bodems, is uiteindelijk besloten om dit niet te doen. De primaire reden hiervoor was het ontbreken van plots op haarpodzolgronden (Hd30); hierdoor is het vergelijken van trends op haarpodzolgronden en bruine bosgronden onmogelijk. De secundaire reden hiervoor is gelegen in de 70% onzekerheid van de beschikbare stikstofcijfers. Dit zal verder toegelicht worden in de discussie. Ter illustratie is wel een kaart gemaakt die de gemiddelde stikstofdepositie toont (Bijlage 10). Deze kaart laat duidelijk zien dat de dominante zuidwestelijke windrichting in Nederland ervoor zorgt dat gebieden ten noordoosten van de Randstand en de FoodValley te maken hebben met een hoge mate van stikstofdepositie.

4. Discussie

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: “Wat is het verband tussen populatietrends en broedsucces van bosvogels op zandgronden die verschillen in stikstofdepositie en verzuringgevoeligheid?” Literatuuronderzoek (hoofdstuk 1) leidde tot de verwachting dat trends in populaties en broedsucces minder gunstig zouden zijn op verzuringgevoelige haarpodzolgronden dan op minder verzuringgevoelige bruine bosgronden. Het bleek onmogelijk om populatietrends te onderzoeken voor deze twee bodemtypen. Regionale populatietrends tonen een matige afname van koolmezen en pimpelmezen en een matige toename van bonte vliegenvangers op hoge zandgronden in Midden-Nederland. Uit de analyse van het broedsucces bleek dat het aandeel succesvolle nesten van de drie soorten niet statistisch significant verschilt per bodemtype, indien men corrigeert voor jaareffecten. Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest lag bij twee van de drie soorten juist lager op bruine bosgronden dan op haarpodzolgronden. Deze bevindingen sluiten niet aan op de verwachting en vragen om een kritische reflectie.

4.1 Kritische reflectie op de bevindingen

4.1.1 Kritische reflectie op de populatietrends

Een eerste interessant vraagstuk is waarom zowel de kool- als pimpelmees in regio Midden een sterkere daling in de populatietrend laat zien dan in de regio's Noord en Zuid. Bij de koolmees is het verschil het grootst: de trend voor regio Midden laat een afname van 2,1% per jaar zien, terwijl in regio Zuid een toename van 2,7% te zien is. Een mogelijke verklaring hiervoor is de relatief hoge stikstofdepositie in regio Midden (Bijlage 10) in combinatie met het grote aandeel verzuringgevoelige bodems aldaar (Bijlage 3). In dit onderzoek bleek het onmogelijk om deze verklaring te toetsen, vanwege een tekort aan Hd30 en Y30-bodems in regio Noord en Zuid, maar een uitgebreide studie naar de verzuringgevoeligheid van overige bodemtypen binnen de verschillende regio's zou daar in de toekomst uitsluitsel over kunnen geven. In een dergelijke studie kan men ook onderzoeken of overige bosvogelsoorten dezelfde afnemende trend laten zien in regio Midden ten opzichte van regio Noord en Zuid; gevonden trendverschillen zou men bovendien statistisch kunnen toetsen.

Een tweede interessant vraagstuk is waarom de populatietrends voor kool- en pimpelmezen afnemen, terwijl bij bonte vliegenvangers een toename te zien is (zoals eerder ook gerapporteerd in Zuid-Zweden door Carlsson in 1991). Een mogelijke verklaring voor de verschillende populatietrends is gelegen in verschillen in voedselkeuze. Bures en Weidinger (2003) toonden aan dat bonte vliegenvangers miljoenpoten (*Diplopoda*) en pissebedden (*Isopoda*) verkiezen als calciumbron, waar koolmezen kiezen voor huisjesslakken (en pimpelmezen ook, volgens Ramsay & Houston, 1999). Uit diverse studies (Graveland et al., 1994 en Wäreborn, 1992) blijkt dat de dichtheid van slakken op hoge zandbodems sterk is afgenomen; van miljoenpoten en pissebedden is dit niet bekend. Graveland en Van Gijzen (1994) concludeerden dat miljoenpoten en pissebedden soms wel 100 keer meer calcium bevatten dan andere voedselbronnen. Miljoenpoten en pissebedden zijn misschien wel even sterk afgenomen als huisjesslakken, maar aangezien ze een sterke bron van calcium vormen, hebben bonte vliegenvangers er misschien ook maar weinig van nodig en ontstaat er bij bonte vliegenvangers nog geen calciumdeficiëntie. Daarnaast blijkt uit onderzoek van Espín et al. (2016) dat bonte vliegenvangers in vergelijking met koolmezen waarschijnlijk minder calcium nodig hebben.

Een andere verklaring voor het verschil in populatietrends van de geanalyseerde vogelsoorten is gelegen in het herstel van de bonte vliegenvanger als reactie op klimaatverandering. Migrerende soorten, zoals de bonte vliegenvanger hebben een nadeel ten opzichte van standvogels, zoals de koolmees, als het gaat om aanpassing aan klimaatverandering. De migrerende soort kan immers ten tijde van vertrek nog geen rekening houden met de omstandigheden op de broedbestemming, terwijl een standvogel zich in een slecht jaar bijvoorbeeld kan aanpassen op lage temperaturen en later kan

beginnen met de leg. Op die manier kan de standvogel ervoor zorgen dat de geboorte van de jongen plaatsvindt op het moment dat er ook sprake is van een rupsenpiek. Als gevolg hiervan liet de bonte vliegenvanger in de periode van 1987-2003 een sterke afname zien (Both et al., 2006). Daarna is deze soort zich gaan aanpassen aan een vroegere voedselpiek door vroeger op de broedgronden aan te komen en die aanpassing is inmiddels terug te zien in het herstel van de populatie (Boele et al., 2018). De vraag is wat de populatietrend zal doen als de aanpassing op klimaatverandering niet langer de populatietrend beïnvloedt.

4.1.2 Kritische reflectie op de ontwikkelingen in broedsucces

Op de website van Sovon staat over de koolmees: *“In naaldbossen op arme zandgronden zijn de broedresultaten matig door kalkgebrek en wordt enige afname verwacht”* (Sovon, 2018). Uit de resultaten van dit afstudeeronderzoek (hoofdstuk 3) blijkt dat de broedvogels op arme zandgronden (haarpodzolgronden) een hoger broedsucces hebben dan hun soortgenoten in gemengde bossen op rijkere gronden (bruine bosgronden). Deze bevindingen contrasteren met de stelling van Sovon en met de verwachtingen die er waren bij aanvang van dit afstudeeronderzoek. De verklaring hiervoor is wellicht gelegen in de sleutelrol die de eik (*Quercus* spp.) speelt in het ecosysteem. Van den Burg (2017) concludeerde dat eikensterfte een belangrijke schakel lijkt te zijn in de problematiek van de voedselketen van loofbossen op hoge zandgronden. Deze eikensterfte wordt mogelijk veroorzaakt door een afgenomen buffercapaciteit en verzuring van de bodem. Als gevolg hiervan ontstaan hoge stikstof- en lage nutriëntengehalten (Van den Burg et al., 2015). Van den Burg (2017) toont in zijn artikel de afgenomen calciumgehalten in het eikenblad in de twee gebieden (Ginkelse en Edese bos) in een grafiek. Op basis van deze informatie zijn problemen met betrekking tot calciumdeficiëntie bij broedvogels misschien wel eerder te verwachten in gemengde bossen en loofbossen, dan in naaldbossen. In elk geval verdient de eikensterfte meer aandacht in de ontrafeling van de problematiek rondom calciumdeficiëntie in het ecosysteem van hoge zandgronden.

Effecten van calciumtekorten in loofbossen zijn ook elders gerapporteerd: Tilgar et al. (2002) observeerden in Estland negatieve effecten van calciumtekorten op het broedsucces van koolmezen in zowel loof- als naaldbossen. In de gegevens die over langere perioden verzameld waren, bleek het broedsucces in loofbossen te verbeteren als gevolg van calciumsuppletie. De auteurs concluderen dat, ondanks het feit dat er meer slakken voorkomen in loofbossen dan in naaldbossen, koolmezen in loofbossen nog steeds meer tijd en energie kwijt zijn om aan voldoende calcium te komen om optimaal te kunnen voortplanten. Dit ondersteunt de stelling van Graveland en Berends (1997) dat calcium-specifiek foerageren een flinke investering is van energie, zelfs in relatief calciumrijke milieus. Bovendien blijkt uit onderzoek van Gosler en Wilkin (2017) dat niet alleen op verzuringgevoelige, basenarme bodems calciumdeficiëntie kan ontstaan met gevolgen voor meerdere trofische niveaus, maar dat eenzelfde proces ook op minder verzuringgevoelige, calciumrijkere bodems tot een verminderd broedsucces begint te leiden bij koolmezen als gevolg van zure depositie. Als deze problematiek ook in Nederland speelt op calciumrijkere bodems, dan zou dit mede verklaren waarom in de landelijke populatietrends een matige afname van koolmezen te zien is: een afname in broedsucces als gevolg van calciumdeficiëntie ligt dan aan de basis hiervan.

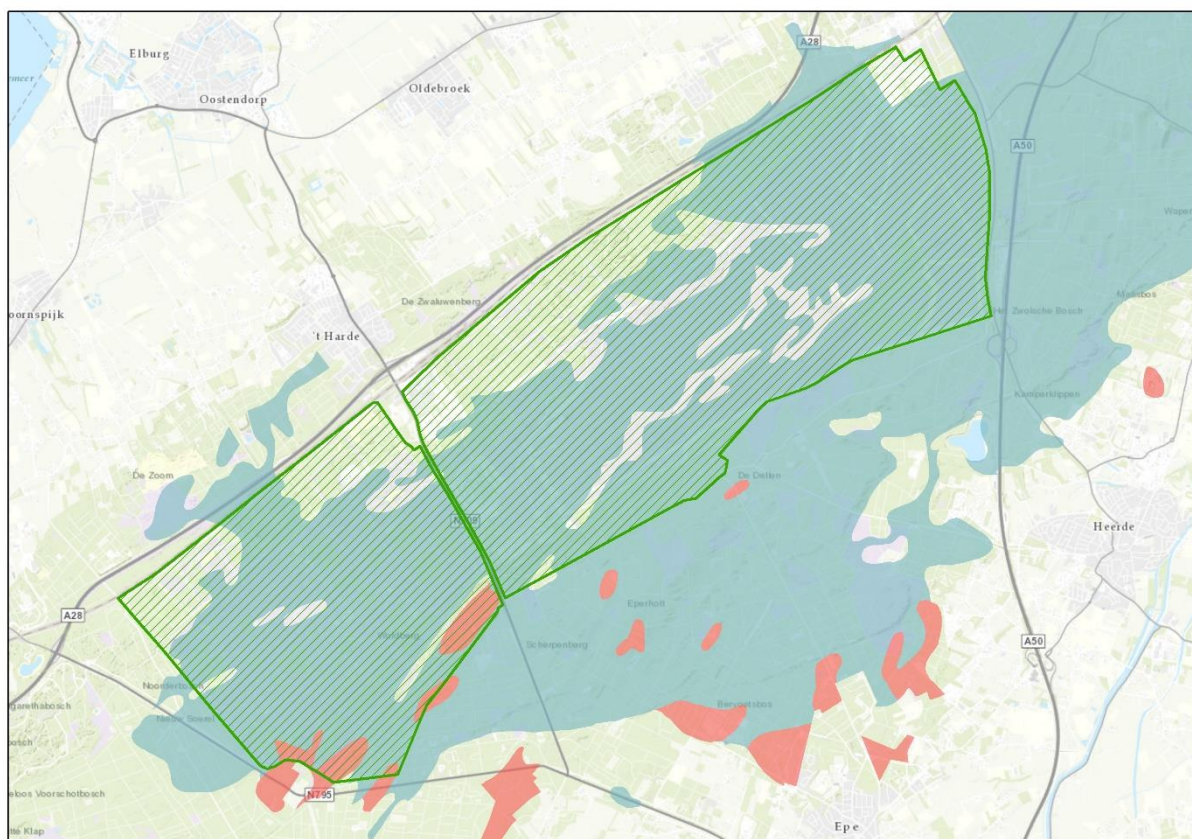
Naast bovenstaande habitatspecifieke effecten, kan calciumdeficiëntie ook leiden tot soort- of populatiespecifieke effecten, zo blijkt uit een studie van Mänd et al. (2003). Waar koolmezen bleken te reageren op calciumtekorten met minder broedpogingen en een verminderd broedsucces, bleken bonte vliegenvangers in dezelfde habitat te investeren in hun broedpoging ondanks de toegenomen kosten voor het voortplanten (Mänd et al., 2003). In 2005 werd bovendien een Belgische studie gepubliceerd (Dauwe et al., 2005) naar de effecten van zware metalen op broedsucces en -kwaliteit bij mezen. Uit dit onderzoek blijkt dat de vervuiling een significant effect had op de proportie nesten met ei-leg-interrupties bij pimpelmezen, maar dat geen enkel ander broedgerelateerd kenmerk wordt beïnvloed door de zware metalen. Dit staat in schril contrast met de effecten op koolmezen die in

hetzelfde gebied zijn bestudeerd en waaruit blijkt dat zware metalen geen invloed hebben op de voedselbeschikbaarheid voor koolmezen. De auteurs concluderen daarom dat ondanks het feit dat koolmezen en pimpelmezen nauw verwant zijn aan elkaar, de soorten kunnen verschillen in hun sensitiviteit voor de directe en indirecte effecten van vervuiling van hun leefomgeving met zware metalen. Naar analogie van de verschillen tussen kool- en pimpelmezen in de effecten van vervuiling met zware metalen op broedgerelateerde kenmerken, zou men kunnen stellen dat ook de effecten van calciumtekorten op broedgerelateerde kenmerken die gevonden worden bij één soort, niet gegeneraliseerd kunnen worden naar andere soorten.

4.2 Kritische reflectie op de methodiek

4.2.1 Kritische reflectie op de methodiek met betrekking tot populatietrends

Op basis van dit onderzoek kan bewezen noch ontkracht worden dat verzuring als gevolg van stikstofdepositie een oorzaak is voor de afname in populatietrends van koolmezen en pimpelmezen. Er waren namelijk onvoldoende gegevens om een vergelijking te kunnen maken tussen de populatietrends op haarpodzolgronden en bruine bosgronden, bij verschillende mate van stikstofdepositie. Er blijkt vooral een tekort aan gegevens over aantallen broedparen op haarpodzolgronden. Op deze bodems worden vooral bijzondere soorten (BMP-B) geteld en daarom is er over de kernsoorten van dit project (koolmezen, pimpelmezen en bonte vliegenvangers) te weinig bekend. Daarnaast is circa 5% van de haarpodzolgronden gelegen onder ontoegankelijk terrein, zoals het terrein van Defensie in 't Harde (Figuur 17). De ontoegankelijkheid van dit gebied leidt er waarschijnlijk toe dat het gebied niet integraal geïnventariseerd wordt.



Figuur 17. Artillerie schietkamp 't Harde (groen omlijnd) is in verband met de veiligheid niet toegankelijk. Het totale gebied is circa 5000 hectare groot, circa 3500 hectare hiervan betreft bodemtype Hd30 (blauw) of Y30 (rood).

Een secundair argument waarom uiteindelijk afgeweken is van de doelstelling om het verband te beschrijven tussen populatietrends en broedsucces van bosvogels op zandbodems die verschillen in stikstofdepositie en verzuringgevoeligheid, komt voort uit de onzekerheid met betrekking tot de cijfers

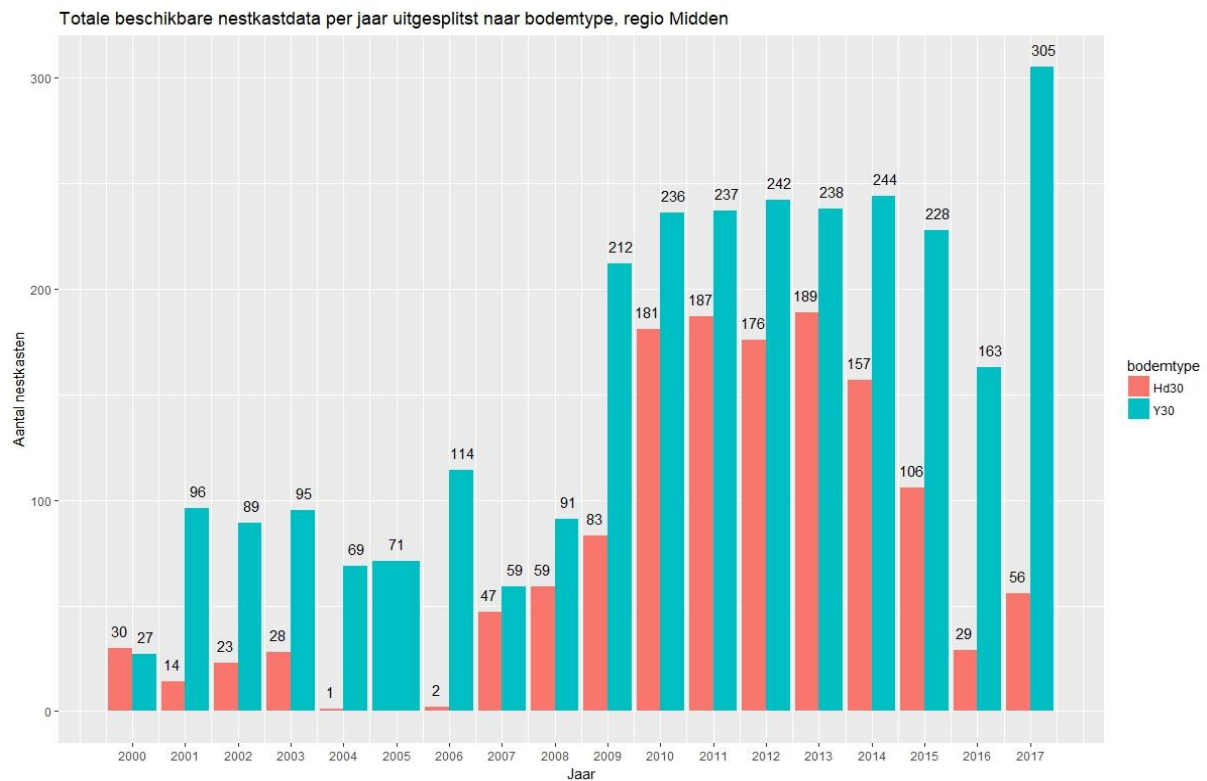
over stikstofdepositie. De enige cijfers over stikstofdepositie in Nederland, zijn afkomstig uit AERIUS. AERIUS is een rekenprogramma dat is gebaseerd op het Operationale Prioritaire Stoffen Model (OPS) (Wilmot & de Heer, 2014). Dit model wordt sinds de jaren '90 gebruikt voor het in kaart brengen van de grootschalige verspreiding van stikstof vanuit individuele bronnen. Regionale bronnen en buitenlandse bronnen worden hierbij in één berekening gecombineerd. Het OPS wordt jaarlijks gevalideerd en gekalibreerd op basis van veldmetingen. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) van het RIVM en van het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN). Het LML bestaat uit ca. 100 meetpunten, maar niet bij alle meetpunten wordt ammoniak gemeten. Het MAN bestaat uit 300 meetpunten verspreid over 60 Natura 2000-gebieden; de metingen die hier worden gedaan zijn eenvoudiger dan in het LML en daarmee ook minder nauwkeurig (RIVM, 2015). Als gevolg van de schattingsmethode en als gevolg van het beperkt aantal daadwerkelijke meetpunten bevatten de GDN-kaarten die gebaseerd zijn op de absolute cijfers uit AERIUS een onzekerheid van 70% (Metz, 2015). Uit vergelijkingen tussen geschatte en gemeten depositiewaarden blijkt dat de werkelijke depositie op een bepaalde plaats 70% hoger of lager kan zijn dan berekend. Bovendien is de kaart met 1x1 km grofmazig in vergelijking met de gegevens over bodemtypen (die op 1x1 ha gekarteerd zijn).

Om in elk geval een beeld te hebben van de populatietrends op hoge zandgronden zijn in dit afstudeeronderzoek de door Sovon en het CBS gegenereerde regionale trends van bosvogels op hoge zandgronden in de afgelopen tien jaar in detail bestudeerd. Aangezien hoge zandgronden divers kunnen zijn voor wat betreft voedselrijkdom en verzuringgevoeligheid, geven deze populatietrends weinig inzicht in de gevolgen van bodemverzuring op calciumdeficiëntie bij broedvogels.

4.2.1 Kritische reflectie op de methodiek met betrekking tot broedsucces

De analyse van de broedgegevens levert een resultaat op dat moeilijk te plaatsen is binnen het theoretische kader zoals dat in de inleiding van dit afstudeeronderzoek is beschreven; het is onduidelijk waarom het aandeel succesvolle nesten van koolmezen, pimpelmezen en bonte vliegenvangers op verzuringgevoelige haarpodzolgronden hoger lijkt te liggen dan op de minder verzuringgevoelige bruine bosgronden. Ook is onduidelijk waarom koolmezen en bonte vliegenvangers gemiddeld meer uitgevlogen jongen per succesvol nest produceren op verzuringgevoelige haarpodzolgronden dan op de minder verzuringgevoelige bruine bosgronden. In paragraaf 4.1 is gepoogd om deze bevindingen vanuit inhoudelijk opzicht te verklaren. Hoewel geprobeerd is om de analyses zo goed mogelijk op te zetten en zo nauwkeurig mogelijk uit te voeren op zo betrouwbaar mogelijke data, zouden ook fouten in de methodologie van dit afstudeeronderzoek aan de basis van de onverwachte bevindingen kunnen liggen.

Het verschil in aantal beschikbare nestkastdata van de geanalyseerde jaren kan een verklaring zijn voor de onverwachte bevindingen. Werkgroep NESTKAST is opgericht in 2008, van de jaren hiervoor is gebleken dat er minder data beschikbaar zijn (zie figuur 18). Door onbekende redenen zijn er vooral uit de jaren 2004, 2005 en 2006 weinig data beschikbaar van het bodemtype Hd30, wat van invloed zou kunnen zijn op de resultaten van de analyse. In 2006 waren er bijvoorbeeld voor Hd30-bodems data van maar twee nestkasten. Beide nestkasten werden gebruikt door koolmezen: één nest was succesvol, het andere mislukte. Hierdoor is het percentage succesvolle nesten voor dat jaar 50%, wat een rare uitschieter oplevert. In de analyse is gekozen om te corrigeren voor de jaareffecten om de analyse toch vanaf het jaar 2000 uit te kunnen voeren. Het is mogelijk dat ondanks deze correctie het "gat" in de data heeft gezorgd voor een vertekend beeld.



Figuur 18. Totale beschikbare nestkastdata per jaar, regio Midden opgesplitst naar bodemtype.

Een andere moeilijkheid in de analyse van de broedgegevens die tot vertekening van de resultaten geleid kan hebben, is de variabele ‘habitat’. Bij exploratie van de verkregen dataset bleek dat deels niet van toepassing zijnde habitats waren opgenomen: daarom zijn nesten gelegen in ‘bebouwing’ en in ‘tuin in woonwijk’ met dat argument uit de dataset verwijderd alvorens tot analyse over te gaan. Vervolgens resteerden habitats die globaal konden worden verdeeld in rijk (zoals loofbos), midden (gemengd bos) en arm (zoals naaldbos of kleine bomengroep op heide). Met deze categoriale variabele is vervolgens gecorrigeerd in de analyse, maar daarbij veranderden de resultaten niet. Aangezien de overgrote meerderheid (details in tabel 13) van de nesten in gemengd bos gelegen was, was er waarschijnlijk te weinig statistische power om op zinvolle wijze te corrigeren voor habitat (voor verspreiding van de nestkasten over verschillende habitats zie bijlage 11, 12 en 13).

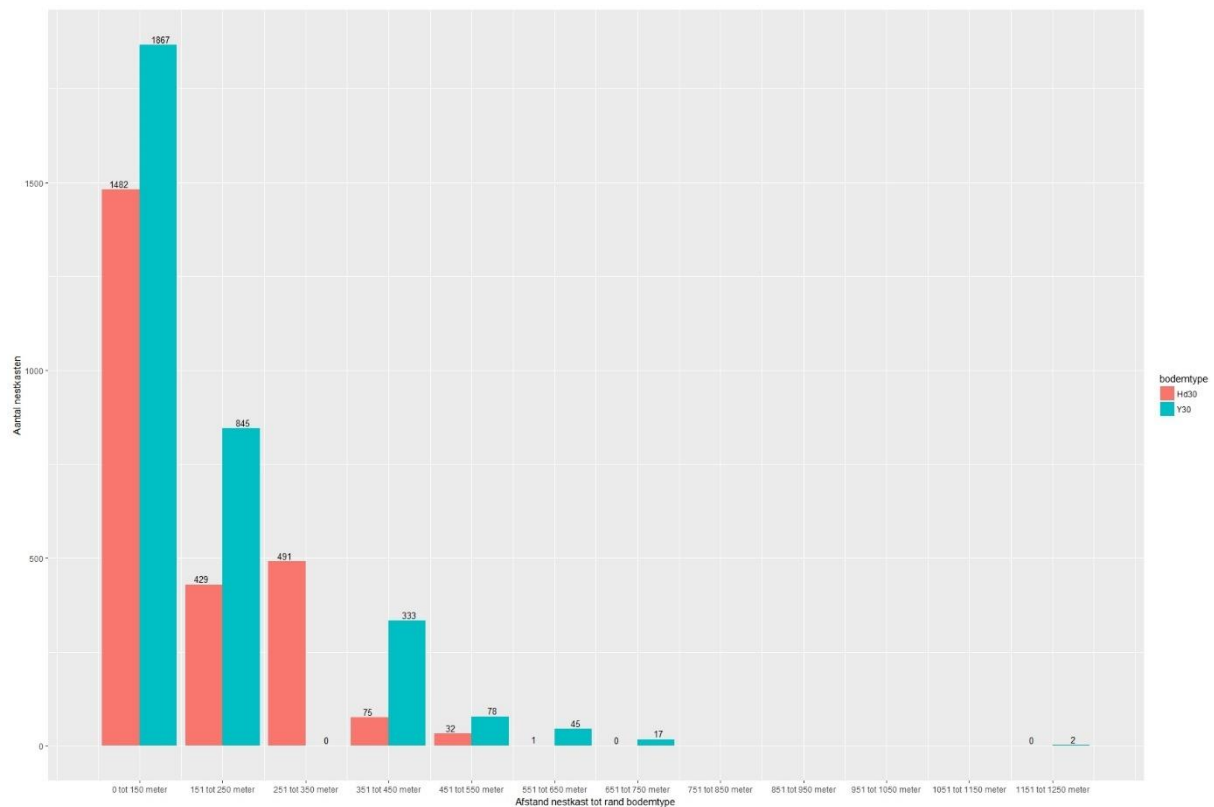
Tabel 13. Voorbeeld van verdeling habitats bij de koolmees

Habitat	Hd30-bodem	Y30-bodem
Arm	56	94
Midden	310	653
Rijk	33	72
Totaal	399	819

Daarnaast is het bodemtype (haarpodzolgronden of bruine bosgronden) misschien niet voldoende representatief voor de verzuringgevoeligheid. Het bodemtype is bepaald aan de hand van de bodemkaart van Nederland, die circa 40 jaar oud is. Uit de studie van Bergsma et al. (2016) blijkt dat een zandbodem onder sterk verzurende omstandigheden zeer snel een podzol-B kan ontwikkelen. Siepel et al. (2018) toonden op de Veluwe aan dat de toplaag van bruine bosgronden sterk uitgeloozd kan raken, waardoor een uitpoelingshorizont ontstaat, vergelijkbaar met haarpodzolgronden. Siepel zag bovendien dat de vegetatie, die sterk op reageert op de bovenste bodemlaag, op bruine bos- en haarpodzolgronden gedurende de tijd steeds meer op elkaar ging lijken (persoonlijke communicatie, H. Siepel, 2018). De vraag is dan ook of zich op bruine bosbodems inmiddels een vergelijkbaar proces van bodemverzuring afspeelt als op haarpodzolgronden. Wellicht is het contrast tussen de situatie

voor en na de verzuring van de bruine bosgronden zelfs groter dan de situatie voor en na de verzuring op een arme bodems, zoals haarpodzolgronden. Tot slot kent de schaal van de bodemkaart ook nog een beperking: de kleinste te karteren eenheid op deze bodemkaart is 250 bij 250 meter. Deze grove kaartschaal heeft tot gevolg dat lokaal toch sprake zou kunnen zijn van een ander bodemtype dan de bodemkaart weergeeft. De beste manier om hier in toekomstig onderzoek mee om te gaan, is door op directe wijze het calciumgehalte te bepalen in de bodem, zodat calciumgehalte als continue variabele kan worden geanalyseerd in vergelijkingen tussen meer en minder verzuringgevoelige gebieden.

Ook randeffecten kunnen de resultaten vertekend hebben. Randeffecten ontstaan doordat de broedvogel wiens nest op één bodemtype gelegen is, in de werkelijkheid foerageert in een bos op een ander, naastgelegen bodemtype. Concreet betekent dit dat een vogel die zijn nest heeft op voedselarme en verzuringgevoelige haarpodzolgrond, een voedselterritorium heeft dat een veel groter gebied bestrijkt dat zelfs op voedselrijke en niet-verzuringgevoelige bodem kan liggen. Het is aannemelijk dat er sprake is van dergelijke randeffecten in dit afstudeeronderzoek, omdat uit nadere analyse blijkt dat de meerderheid van de nestkasten gelegen is binnen een straal van 300 meter van de rand van het bodemtype (Figuur 19) en uit de studie van Wilkin et al. (2009) blijkt dat vrouwelijke koolmezen interterritoriaal (>300 m van het nest) foerageren tijdens het leggen van eieren om aan voldoende calcium te komen om eieren te kunnen leggen.



Figuur 19. Aantal nesten en afstand tot rand van bodemtype uitgesplitst naar bodemtype.

Tot slot is de uitgevoerde statistische methode misschien niet de beste methode geweest om tot betrouwbare resultaten te komen voor de berekening van het broedsucces. Allereerst is in deze studie gebruik gemaakt van de 'klassieke methode'. Bij de klassieke methode worden nesten opgezocht en wordt bij die nesten vervolgens geïnventariseerd hoe groot het percentage is dat uitkomt. Deze methode kent een belangrijke valkuil: zij geeft een systematische overschatting van het broedsucces, tenzij men alle nesten vanaf de eerste legdag monitort (Beintema, 1992). De reden hiervoor is dat de nesten die verloren gaan voordat ze gevonden worden, niet meetellen. Om dit te ondervangen zijn er verschillende oplossingen bedacht, waar onder de Mayfield-methode. Deze methode kan beschouwd

worden als de beste methode om het aandeel succesvolle nesten te berekenen. Hoewel de Mayfield-methode de beste methode is voor het berekenen van broedsucces, is deze ook ingewikkelder én niet strikt noodzakelijk indien gewerkt wordt met het broedsucces van holenbroeders die in nestkasten broeden. In die situatie heeft men namelijk meer controle over de nesten en is de kans klein dat een bestaand nest niet gevonden wordt, tenzij het nest zich buiten een nestkast bevindt. Ten tweede is ervoor gekozen om de uitkomsten van het aandeel succesvolle nesten niet te combineren met het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest. Een dergelijke analyse is complex en het is onduidelijk hoe het best kan worden omgegaan met het combineren van de twee standaardfouten in één analyse (persoonlijke communicatie, C. van Turnhout, 2018).

4.3 Reikwijdte van de resultaten en volgende stappen in onderzoek

Dit afstudeeronderzoek had tot doel om met beschikbare data uit BMP- en Nestkast-inventarisaties te bepalen of er verschillen zijn in populatietrends en broedsucces van bosvogels op voedselarme zandgronden met verschillende verzuringgevoeligheid en stikstofbelasting. Het secundaire doel van dit afstudeeronderzoek was: evalueren of de bevindingen van Van den Burg (2017) uit het Ginkelse bos op grotere ruimtelijke schaal spelen en of ze relevant zijn voor meerdere vogelsoorten van bossen op voedselarme zandgronden. Vanwege een tekort aan gegevens over broedvogels op verzuringgevoelige haarpodzolgronden én vanwege de grote onzekerheid in de stikstofdepositiecijfers, kon het hoofddoel niet bereikt worden. Desalniettemin levert dit afstudeeronderzoek nieuwe inzichten op:

1. Op basis van de vergelijking van landelijke en regionale populatietrends op hoge zandgronden kan aangetoond, noch uitgesloten worden dat bodemverzuring door stikstofdepositie een oorzaak is voor de afname van kool- en pimpelmezen op regionale schaal. Bonte vliegenvangers vertonen een toenemende trend die waarschijnlijk de aanpassing aan klimaatverandering weergeeft, maar de vraag is wat de trendgegevens van deze soort in de toekomst zullen laten zien als de effecten van deze aanpassing niet meer actueel zijn.
2. Op basis van de vergelijking van het broedsucces op verzuringgevoelige haarpodzolgronden en minder verzuringgevoelige bruine bosgronden kan niet aangetoond worden dat broedvogels op verzuringgevoelige haarpodzolgronden een slechter broedsucces hebben dan op minder verzuringgevoelige bruine bosgronden. Het aandeel succesvolle nesten van koolmezen, pimpelmezen en bonte vliegenvangers verschilt niet statistisch significant op beide bodemtypen. Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest lag bij twee van de drie soorten juist lager op bruine bosgronden dan op haarpodzolgronden.

Deze inzichten sluiten niet aan bij de bevindingen van Van den Burg uit 2017; deze tegenstrijdigheid vraagt om nader onderzoek. Vervolgstappen in wetenschappelijk onderzoek zijn:

1. Waarnemers die verantwoordelijk zijn voor inventarisaties van bijzondere soorten (BMP-B) van telgebieden op haarpodzolgronden zo spoedig mogelijk betrekken bij de inventarisatie van enkele algemene soorten, zoals de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger, zodat er voldoende data worden verzameld om in de toekomst een analyse van de effecten van stikstofdepositie, bodemverzuring en calciumdeficiëntie op populatietrends bij deze vogelsoorten mogelijk te maken.
2. Om vast te stellen of verschillen in populatietrends van broedvogels in regio Noord, Midden en Zuid veroorzaakt worden door verschillen in stikstofdepositie en verzuringgevoeligheid, dient men uitgebreider onderzoek te doen naar de verzuringgevoeligheid van de bodemtypen in de diverse regio's én naar de populatietrends van overige bosvogelsoorten.
3. Uit eerder onderzoek op terreinen van Defensie (Spoelstra et al., 2017) blijkt dat ontoegankelijke terreinen van defensie onder bepaalde voorwaarden voor ecologisch

onderzoek kunnen worden opengesteld. Aangezien Artillerie-schietkamp 't Harde gelegen is op ca. 5% van de haarpodzolgronden in Nederland, is een inventarisatie volgens BMP-A protocol en/of een nestkastenonderzoek in dit gebied informatief in het kader van de studie naar de effecten van stikstofdepositie op verzuringgevoelige bodems.

4. Het is belangrijk dat onderzoekers die van het broedsucces van holenbroeders in nestkasten (leden van de NESTKAST werkgroep) bij elke nestcontrole rapporteren of er aanwijzingen zijn voor calciumdeficiëntie. Op basis van de studie van Gosler en Wilkin (2017) blijkt dat een afwijkende pigmentatie van eieren hiervoor een goede indicator is. Bij uitgekomen jongen dient men alert te zijn op symptomen van rachitis, zoals beschreven in paragraaf 1.2.2.
5. Gerapporteerde verschillen in broedsucces tussen diverse gebieden kunnen het gevolg zijn van subtiele, maar cruciale verschillen in (rijkdom van het) bodemtype. Aangezien de bodemkaart verouderd en grofmazig is, verdient het aanbeveling om in vervolgonderzoek te werken met absolute, gemeten calciumwaarden van de bodem.
6. Eikenbomen spelen een sleutelrol in het ecosysteem van broedvogels op hoge zandgronden. Bij vervolgonderzoek is het belangrijk om het calciumgehalte in de bladen van de eik te meten om te kunnen bepalen of de eik een cruciale rol speelt in het ontstaan van calciumdeficiëntie bij broedvogels.
7. Zeer veel variabelen spelen een (interacterende) rol in de voedselketen van bossen op hoge zandgronden. Voorbeelden daarvan zijn calcium- en nutriëntengehaltes in de bodem, bodemdieren, vegetatie, fauna, interspecifieke concurrentie en antropogene aspecten als stikstofdepositie en schelpenpaden. De complexiteit van deze voedselketen vereist uitgebreid, gedetailleerd en liefst langlopend observationeel onderzoek om tot gedegen conclusies te komen over de relatie tussen stikstofdepositie, bodemverzuring en calciumdeficiëntie op diverse trofische niveaus. Dergelijk onderzoek is tot op heden nog niet opgezet of uitgevoerd in Nederland. Het Buunderkampbos is een locatie waar in de jaren tachtig en negentig veel verschijnselen van calciumdeficiëntie bij broedvogels zijn waargenomen; dit zou een geschikt gebied zijn om opnieuw onderzoek te doen en historische met actuele bevindingen te vergelijken.
8. Indien opnieuw nestkaststudies of bekalkingsexperimenten worden gedaan in het kader van bodemverzuring en calciumdeficiëntie bij broedvogels, is het van belang dat de nestkasten worden opgehangen in de kern van gebieden met een homogeen calciumgehalte. Daarbij dienen de kasten op meer dan 300 meter van de begrenzing van het betreffende gebied opgehangen te zijn, ter preventie van randeffecten en interterritoriaal foerageren.
9. Een veldexperiment waarin stikstof onder gecontroleerde omstandigheden op een dusdanig groot oppervlak wordt gedeponneerd dat het van invloed kan zijn op broedvogels, is naar alle waarschijnlijkheid zowel praktisch, ethisch als financieel niet haalbaar.

5. Conclusie

Op basis van de beschikbare data kon de hoofdvraag van deze studie niet beantwoord worden. De regionale populatietrend van koolmezen en pimpelmezen is afnemend, maar er kon niet aangetoond of uitgesloten worden dat er een verband is tussen bodemverzuring en deze afnemende trend; daarom kon ook het effect van stikstofdepositie niet onderzocht worden. De regionale populatietrend van bonte vliegenvangers is toenemend en dat is waarschijnlijk het gevolg van een aanpassing aan klimaatverandering. Op basis van de vergelijking van het broedsucces op verzuringgevoelige haarpodzolgronden en minder verzuringgevoelige bruine bosgronden kan niet aangetoond worden dat broedvogels op verzuringgevoelige haarpodzolgronden een geringer broedsucces hebben dan op minder verzuringgevoelige bruine bosgronden. Integendeel, er zijn aanwijzingen dat het broedsucces hoger is op verzuringgevoelige haarpodzolgronden, maar dit blijkt alleen uit het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen en niet uit het aandeel succesvolle nesten. Vervolgonderzoek is noodzakelijk om de effecten van stikstofdepositie op broedvogels van bossen op hoge zandgronden te begrijpen en gedegen keuzes voor beheer en beleid te kunnen maken.

6. Aanbevelingen voor de praktijk

Op basis van de resultaten van deze studie is het niet mogelijk aanbevelingen te doen over beheermaatregelen tegen bodemverzuring, zoals de bekalking in bossen op verzuringgevoelige bodems. Er is meer onderzoek nodig alvorens het beheer en beleid kan worden aangepast. Er zijn wel aanbevelingen voor de praktijk die bijdragen aan wetenschappelijk vervolgonderzoek, zoals beschreven in paragraaf 4.3:

Het verdient aanbeveling om:

1. Vogelwerkgroepen en vrijwillige waarnemers voor te lichten over het belang van het monitoren volgens het BMP-A protocol, omdat juist de gegevens van enkele algemene vogelsoorten waardevol kunnen zijn om populatietrends te kunnen vergelijken met trends in broedsucces die voortkomen uit onderzoek naar algemene holenbroeders, zoals de koolmees, pimpelmees en bonte vliegenvanger.
2. Nestkastonderzoek op haarpodzolgronden en bruine bosgronden door vogelwerkgroepen te stimuleren. Hierbij is het van belang om gebieden te kiezen waar één van beide bodemtypen een grote oppervlakte bestrijkt. De nestkasten dienen zoveel mogelijk in het centrum van de gebieden te worden opgehangen ter preventie van randeffecten en interterritoriaal foerageren.
3. Terreinbeheerders op de hoogte te brengen van de werkzaamheden en het protocol van werkgroep NESTKAST, zodat zij vrijwilligers kunnen adviseren om te werken volgens dit protocol en verzamelde gegevens te delen met deze werkgroep.
4. Met Defensie in overleg te gaan over de mogelijkheid om onderzoek te doen in het artillerieschietkamp 't Harde. Bij andere projecten in het verleden is dit onder bepaalde voorwaarden mogelijk gebleken.
5. In de gegevensverzameling samen te werken met andere non-profit organisaties om de effecten van stikstofdepositie op het ecosysteem te ontrafelen. Zo zijn een inventarisatie van vegetatie (Floron), slakken (Nederlandse Malacologische Vereniging) en geleedpotigen (Stichting EIS) van grote toegevoegde waarde om de effecten van stikstofdepositie en bodemverzuring op meerdere trofische niveaus in kaart te brengen. Dat geldt ook voor het in kaart brengen van korstmossen (Bryologische en Lichenologische Werkgroep (BLWG) van de KNNV), die een goede indicator zijn van de luchtkwaliteit en bodemanalyse in samenwerking met KNNV werkgroepen die zich bezig houden met bodemkunde en geologie.

Bovenstaande aanbevelingen zijn bedoeld voor vogelwerkgroepen en andere werkgroepen, maar kunnen het beste worden gecoördineerd vanuit Sovon, om een landelijk gestandaardiseerd advies te geven.

Referenties

- Ar, A., Paganelli, C. V., Reeves, R. B., Greene, D. G., & Rahn, H. (1974). The avian egg: water vapor conductance, shell thickness, and functional pore area. *Condor*, 76, 153–158.
- Balkan, M., Karaka, R., & Biricik, M. (2006). Changes in eggshell thickness, shell conductance and pore density during incubation in the Peking Duck (*Anas platyrhynchos* f. dom.). *Ornis Fennica*, 83, 117–123.
- Ballering, L. (2018) Jaarverslag NESTKAST, broedseizoen 2017. Geraadpleegd op 24 januari 2018 van: <https://www.sovon.nl/nl/publicaties/jaarverslag-nestkast-broedseizoen-2017>
- Beintema, A. (1992) Mayfield moet: oefeningen in het berekenen van uitkomstsucces. *Limosa* 65; 155-162
- Beintema, A. J., Baarspul, T., & de Krijger, J. P. (1997). Calcium deficiency in Black Terns (*Chlidonias niger*) nesting on acid bogs. *Ibis*, 139, 396–397.
- Bergsma, H., Vogels, J., Weijters, M., Bobbink, R., Jansen, A., & Krul, L. (2016). Tandrot in de bodem. *Bodem*, (Februari), 27–29.
- Betts, M. M. (1955). The food of titmice in oak woodland. *Journal of Animal Ecology*, 24, 282–323.
- BIJ12 (2018) *Veelgestelde vragen*. Geraadpleegd op 26 april 2018 van: <https://www.bij12.nl/onderwerpen/programma-aanpak-stikstof/veelgestelde-vragen/>
- Bijlsma (2011, maart) De nestkaart: hoe, wat, waar, waarom (Zevende versie)., Sovon, Nijmegen. Geraadpleegd op 12 april 2018 van: <https://www.sovon.nl/sites/default/files/doc/handleiding-nestkaarten.pdf>
- Blog of the Vancouver Avian Research Centre. (2017). Geraadpleegd op 18 december 2017 van: http://www.birdvancouver.com/blog_september11.html
- Bobbink, R., Bal, D., van Dobben, H. F., Jansen, A. J. M., Nijssen, M., Siepel, H., ... de Vries, W. (2014). De effecten van stikstofdepositie op de structuur en het functioneren van ecosystemen. In N. A. C. Smits & D. Bal (Eds.), *Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats* (pp. 41–110). Alterra WUR & Ministerie EZ.
- Bobbink, R., Bergsma, H., den Ouden, J., & Weijters, M. J. (2017). Na het zuur geen zoet? Bodemverzuring in droog zandlandschap blijvend probleem. *Landschap*, 2, 63. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17040050>
- Bodemkaart van Nederland (1991). *Algemene begrippen en indelingen*. 4e editie. Wageningen, DLO-Staring Centrum

- Boele A., van Bruggen J., Slaterus R., Vergeer J.W. & van der Meij. (2018). *Broedvogels in Nederland in 2016*. Sovon-rapport 2018/01. Sovon Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen. Geraadpleegd op 14 januari 2018 van: https://www.sovon.nl/sites/default/files/doc/rap_2018-01_broedvogelrapport-2016_0.pdf
- Booth, D.T., & Seymour, R.S. (1987). Effect of eggshell thinning on water vapour conductance of Malleefowl (*Laipoa ocellata*) eggs. *Condor*, 89, 453–459.
- Both, C., Bouwhuis, S., Lessels, C.M., Visser, M.E. (2006) Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature*, 441, 81-83, doi:10.1038/nature04539
- Buijsman, E., Aben, J.M.M., Hetteling, J.P., Van Hinsberg, A., Koelemeijer, R.B.A., & Maas, R.J.M. (2010). *Maatregelen tegen verzuring zijn terecht genomen*. PBL publicatie. Den Haag/Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Bures, S., & Weidinger, K. (2003). Sources and timing of calcium intake during reproduction in flycatchers. *Oecologia*, 137(4), 634–641. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1380-7>
- Burley, R. W., & Vahedra, B. V. (1989). *The avian egg: chemistry and biology*. New-York: Wiley-Interscience.
- Byrkjedal, I. (1975). Skeletal remains of microrodents as a source of calcium for Golden Plovers. *Sterna*, 14, 197–198.
- Carlsson, H., Carlsson, L., Wallin, C., & Wallin, N.-E. (1991). Great Tits incubating empty nest cups. *Ornis Svecica*, 1, 51–53.
- Cate, J.A.M. ten, van Holst, A.F., Kleijer, H. en Stolp, J. (1995). *Handleiding bodemgeografisch onderzoek; Richtlijnen en voorschriften; Deel A: Bodem*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Technisch Document 19A.
- Dale, F. H. (1954). Influence of calcium on the distribution of the Pheasant in North America. *Transactions of the North American Wildlife and Natural Resources Conference*, 19, 316–323.
- Dauwe, T., Janssens, E., Pinxten, R., & Eens, M. (2005). The reproductive success and quality of blue tits (*Parus caeruleus*) in a heavy metal pollution gradient. *Environmental Pollution*, 136(2), 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.009>
- de Bakker, H., Edelman-Vlam, A.W. (1976). *De Nederlandse bodem in kleur*. Stichting voor Bodemkartering, Centrum voor landbouwpublicaties en landbouwdocumentatie, Wageningen, 1976
- de Jong, A., Kros, H., Spijker, J., & de Vries, W. (Wageningen E. R. (2017). *Houtoogst in relatie tot nutriëntenvoorraden in bossen op droge zandgronden*. Driebergen.

- de Matos, R. (2008). Calcium Metabolism in Birds. *Veterinary Clinics of North America - Exotic Animal Practice*, 11(1), 59–82. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2007.09.005>
- de Vries, W. (2008). *Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid*. Wageningen.
- Dekhuijzen, H. M., & Schuijl, G. P. J. (1996). Veranderingen in het broedsucces van Koolmees (*Parus major*) en Bonte vliegenvanger (*Ficedula hypoleuca*) op de Veluwe en in het Gooi van 1973-92. *Limosa*, 69, 165–174. <https://doi.org/10.1107/S0108270195015472>
- Den Ouden, J. (2015). Figuur Bodem-pH en Cumulatieve input van H⁺. Wageningen Universiteit. Geraadpleegd op 24 januari 2018 van: <https://bosgroepen.nl/bosgroep-noordoost-nederland/wp-content/uploads/sites/2/2015/11/Presentatie-Jan-den-Ouden-Bodemvruchtbaarheid.pdf>
- Drent, P. J., & Woldendorp, J. (1989). Acid rain and egg shells. *Nature*, (339), 431. <https://doi.org/10.1038/339431a0>
- Dunn, B. E., & Boone, M. A. (1977). Growth and mineral content of cultured chick embryos. *Poultry Science*, 57, 370–377.
- Eeva, T., & Lehikoinen, E. (1995). Egg shell quality, clutch size and hatching success of the Great Tit (*Parus major*) and the Pied Flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) in an air pollution gradient. *Oecologia*, 102, 312–323.
- Espín, S., Ruiz, S., Sánchez-Virosta, P., & Eeva, T. (2016). Effects of calcium supplementation on growth and biochemistry in two passerine species breeding in a Ca-poor and metal-polluted area. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 9809–9821. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6219-y>
- Ferm, M., Westling, O., & Hultberg, H. (2000). Atmospheric deposition of base cations, nitrogen and sulphur in coniferous forests in Sweden - A test of a new surrogate surface. *Boreal Environment Research*, 5(3), 197–207.
- Gosler, A. G., Higham, J. P., & Reynolds, S. J. (2005). Why are birds' eggs speckled? *Ecology Letters*, 8, 1105–1113.
- Gosler, A. G., & Wilkin, T. A. (2017). Eggshell speckling in a passerine bird reveals chronic long-term decline in soil calcium. *Bird Study*, 64(2), 195–204. <https://doi.org/10.1080/00063657.2017.1314448>
- Graveland, J.; Van der Wal, R.; Van Balen, JH; Van Noordwijk, A. (1994). Poor reproduction in forest passerines from decline of snail abundance on acidified soils. *Nature*, 368, 446–448.

- Graveland, J. (1996a). Avian eggshell formation in calcium-rich and calcium-poor habitats: importance of snail shells and anthropogenic calcium sources. *Canadian Journal of Zoology*, 74(6), 1035–1044. <https://doi.org/10.1139/z96-115>
- Graveland, J. (1996b). Calcium deficiency in wild birds. *Veterinary Quarterly*, 18(October), 136–137. <https://doi.org/10.1080/01652176.1996.9694716>
- Graveland, J., & Berends, J. E. (1997). Timing of the calcium uptake and effect of calcium deficiency on behaviour and egg-laying in captive Great Tits, *Parus major*. *Physiological Zoology*, 70, 74–84.
- Graveland, J., & Van Gijzen, T. (1994). Arthropods and seeds are not sufficient as calcium sources for shell formation and skeletal growth in passerines. *Ardea*, 82(2), 299–314. <https://doi.org/10.5253/arde.v82.p299>
- Hoyt, D. F. (1979). Osmoregulation by avian embryos: the allantois functions like a toad's bladder. *Physiological Zoology*, 52, 354–362.
- Itakura, C., Yamasaki, K., Goto, M., & Takahashi, M. (1978). Pathology of experimental vitamin D deficiency rickets in growing chickens. I. Bone. *Avian Pathology*, 7(4), 491–513. <https://doi.org/10.1080/03079457808418305>
- Jongmans, A.G., Van den Berg, M.W., Sonneveld, M.P.W., Peek, G.J.W.C., Van den Berg Saparoea, R.M. (2013) *Landschappen van Nederland: Geologie, bodem en landgebruik* (Eerste druk). Wageningen Academic Publishers, Nederland.
- Jubb, M. R., Wilkin, T. a., & Gosler, A. G. (2006). Eggshell-pigmentation, soil calcium and the local abundance, distribution and diversity of woodland snails (Mollusca). *Ardea*, 94(1), 59–60.
- Karlsson, O., & Lilja, C. (2008). Eggshell structure, mode of development and growth rate in birds. *Zoology*, 111, 494–502.
- Kenniscentrum InfoMil (2018) *AERIUS – berekenen van stikstofdepositie*, geraadpleegd op 26 april 2018 van: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/luchtkwaliteit/thema'/natuur-2/aerius/>
- Korschen, C. E. (1977). Breeding stress of female Eiders in Maine. *Journal of Wildlife Management*, 41, 360–373.
- Krementz, D. G., & Ankney, C. D. (1995). Changes in total body calcium and diet of breeding House Sparrows. *Journal of Avian Biology*, 26, 162–167.
- Kwak, S. G., & Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(2), 144–156. <http://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.2.144>
- Locher, W. P., & de Bakker, H. (1990). *Bodemkunde van Nederland, Deel 1: Algemene Bodemkunde* (Tweede druk). Den Bosch: Malmberg.

- Lucas, R. W., Klaminder, J., Futter, M. N., & Bishop, K. H. (2011). A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams. *Forest Ecology Management*, 262(2), 95–104.
- MacLean, S. F. (1974). Lemming bones as a source of calcium for Arctic sandpipers (*Calidris* spp.). *Ibis*, 116, 552–557.
- Mänd, R., & Tilgar, V. (2003). Does supplementary calcium reduce the cost of reproduction in the Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca*. *Ibis*, 145, 67–77.
- Manuel, A. R., van Aalst, R. M., Bastiaens, H., Bresser, A. H. M., Don, A., & Zoetelief, J. (1984). *Verzuring door atmosferische depositie: Evaluatierapport*. Rotterdam, Delft, Den-Haag.
- Metz, D. (2015) AERIUS Calculator: Toelichting toepassingsbereik en beschrijving rekenmethode. Bilthoven.
- Mundy, P.J., & Ledger, J.A. (1976). Griffon Vultures, carnivores and bones. *South African Journal of Science*, 72, 106–110.
- Murton, R. K., Westwood, N. J., & Isaacson, A. J. (1964). The feeding habits of the Woodpigeon *Columba palumbus*, Stock Dove *C. oenas* and Turtle Dove *Streptopelia turtur*. *Ibis*, 106, 174–188.
- Nager, R. G., Rüegger, C., & van Noordwijk, A. J. (1997). Nutrient or energy limitation on egg formation: a feeding experiment in Great Tits. *Journal of Animal Ecology*, 66, 495–507.
- Nijssen, M. E., WallisDeVries, M. F., & Siepel, H. (2017). Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna. *Biological Conservation*, 212, 423–431.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.022>
- O+BN. (2018). Droog zandlandschap. Geraadpleegd op 15 februari 2018 van:
<https://www.natuurkennis.nl/landschappen/droog-zandlandschap/droog-zandlandschap/bedreigingen-en-kansen-droogzand/>
- Olsthoorn, A. (2005). Het grote bossterven dat uitbleef. *Het Boomblad*, (December), 16–17.
- Opdam, P., Burgers, J., & Muskens, G. (1987). Population trend, reproduction, and pesticides in Dutch Sparrowhawks following the ban on DDT. *Ardea*, 75(2), 205–212. Geraadpleegd op 26 april 2018 van: http://ardea.nou.nu/ardea_show_abstract.php?lang=nl&nr=907
- Over Sovon. (2017). Geraadpleegd op 16 december 2017 van:
<https://www.sovon.nl/nl/content/over-sovon>
- Piersma, T., Gudmundsson, G. a., Davidson, N. C., & Morrison, R. I. G. (1996). Do arctic-breeding Red Knots (*Calidris canutus*) accumulate skeletal calcium before egg laying? *Canadian Journal of Zoology*, 74, 2257–2261. <https://doi.org/10.1139/z96-257>

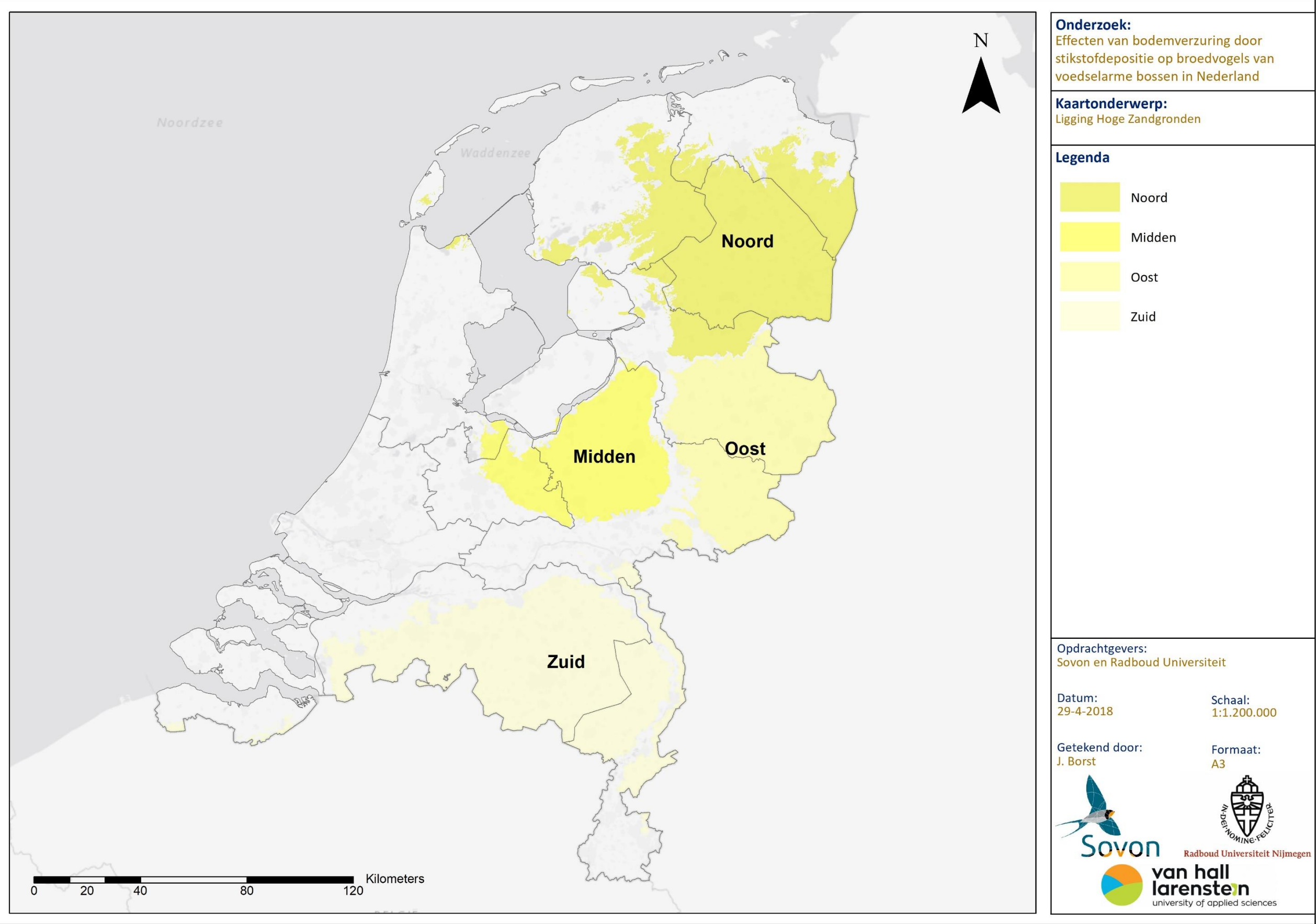
- Pinowska, B., & Krasnicki, K. (1985). Changes in the content of magnesium, copper, calcium, nitrogen and phosphorus in female House Sparrows during the breeding cycle. *Ardea*, 73, 175–182.
- Pulliam, H. R. (1988). Sources, Sinks en Population Regulation. *American Naturalist*, 132(5 (November)), 652–661.
- Pullianen, E., Kallio, T., & Hallaksela, A.-M. (1978). Eating of wood by Parrot Crossbills, *Loxia pytyopsittacus*, and Redpolls, *Carduelis flammea*. *Aquilo Ser Zool*, 18, 23–27.
- Ramsay, S. L., & Houston, D. C. (1999). Do acid rain and calcium supply limit eggshell formation for blue tits (*Parus caeruleus*) in the U.K.? *Journal of Zoology*, 247(1), 121–125.
<https://doi.org/10.1017/S0952836999001120>
- Reynolds, S. J., & Perrins, C. M. (2010). Dietary Calcium Availability and Reproduction in Birds. In C. F. Thompson (Ed.), *Current ornithology* (pp. 31–74). New-York: Springer.
- RIVM. (2012). Emissie van ammoniak. Geraadpleegd op 15 februari 2018 van:
<http://www.rivm.nl/Onderwerpen/A/Ammoniak/Emissies>
- RIVM (2015). Hoe en waar worden ammoniakconcentraties gemeten? Geraadpleegd op 26 april 2018 van:
https://www.rivm.nl/Documenten_en_publicaties/Algemeen_Actueel/Veelgestelde_vragen/Milieu_Leefomgeving/Hoe_en_waar_worden_ammoniakconcentraties_gemeten
- Romanoff, A. L., & Romanoff, A. J. (1949). *The avian egg*. New-York: Wiley.
- Sadler, K. C. (1961). Grit selectivity by the female Pheasant during egg production. *Journal of Wildlife Management*, 25, 339–341.
- Scheuhammer, A. M. (1987). The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury, and lead in birds: a review. *Environmental Pollution*, 46, 263–296.
- Scheuhammer, A. M. (1991). Effects of acidification on the availability of toxic metals and calcium to wold birds and mammals. *Environmental Pollution*, 71, 329–375.
- Schifferli, L. (1976). *Factors affecting weight and conditions in the House Sparrow particularly when breeding*. University of Oxford.
- Siepel, H., Siebel, H., Verstrael, T., van den Burg, A., & Vogels, J. (2009). Herstel van lange termijn effecten van verzuring en vermesting in het droog zandlandschap. *De Levende Natuur*, 110, 124–129.
- Siepel, H., Vogels, J., Bobbink, R., Bijslma, R.J., Jongejans, E., de Waal, R., Weijters, M. (2018) Continuous and cumulative acidification and N deposition induce P limitation of the microarthropod soil fauna of mineral-poor dry heathlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 119, 128-134

- Simkiss, K. (1967). Calcium in Reproductive Physiology. A Comparative Study of Vertebrates. *Science*, 159, 1223–1224.
- Six, K. M., & Goyer, R. A. (1970). Experimental enhancement of lead toxicity by low dietary calcium. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 76, 933–942.
- Sovon (2018) Koolmees: verspreiding en trends, geraadpleegd op 26 april 2018 van: <https://www.sovon.nl/nl/soort/14640>
- Starck, J. M. (1998). Structural variants and invariants in avian embryonic and postnatal development. In J. M. Starck & R. E. Ricklefs (Eds.), *Avian Growth and development: evolution within the altricial-precocial spectrum* (pp. 59–88). Oxford: Oxford University Press.
- Susic, G. (1981). Crossbill (*Loxia curvirostra* L. 1758) feeding on a mortar in a wall. *Larus*, 33–35, 197–200.
- Thaler, E. (1979). Das aktionssystem von Winter- und Sommergoldhänchen (*Regulus regulus*, *R. ignicapillus*). *Bonn Zoological Monographs*, 12, 1–151.
- Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
- Tilgar, V., Mänd, R., & Leivits, A. (1999). Effect of Calcium Availability and Habitat Quality on Reproduction in Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca* and Great Tit *Parus major*. *Journal of Avian Biology*, 30(4), 383–391.
- Tilgar, V., Mänd, R., Mägi, M., Miind, R., & Maigi, M. (2002). Calcium Shortage as a Constraint on Reproduction in Great Tits *Parus major*: A Field Calcium shortage as a constraint on reproduction in great tits *Parus major*: a field experiment. *Journal of Avian Biology*, 33, 407–413. <https://doi.org/10.1034/j.1600-048X.2002.02990.x>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Reece, J. B. (2017). *Campbell Biology* (11th ed.). New-York: Pearson Education US.
- Van den Burg, A. (2017). Rammelende eieren en brekebenen bij de koolmees: verzuring terug bij af? *Vakblad Natuur Bos Landschap*, 14(136), 3–7. Geraadpleegd van: https://vakbladnbl.nl/wp-content/uploads/VNBL_juni2017_koolmezen.pdf
- Van den Burg, A., Bijlsma, R.J. & Bobbink, R. (2015) *Arme bossen verdienen beter*. OBN Deskundigenteam Droog Zandlandschap. KNNV Publishing, Zeist.
- Van den Burg, J. (1983). De betekenis van zure depositie en luchtverontreiniging voor bos en hout in Nederland. *Bos En Hout Berichten*, (8).
- Van den Burg, J. (1991). Bemesting in de Nederlandse bosbouw. *Nederlands Bosbouw Tijdschrift*, (deel 1), 28–36.

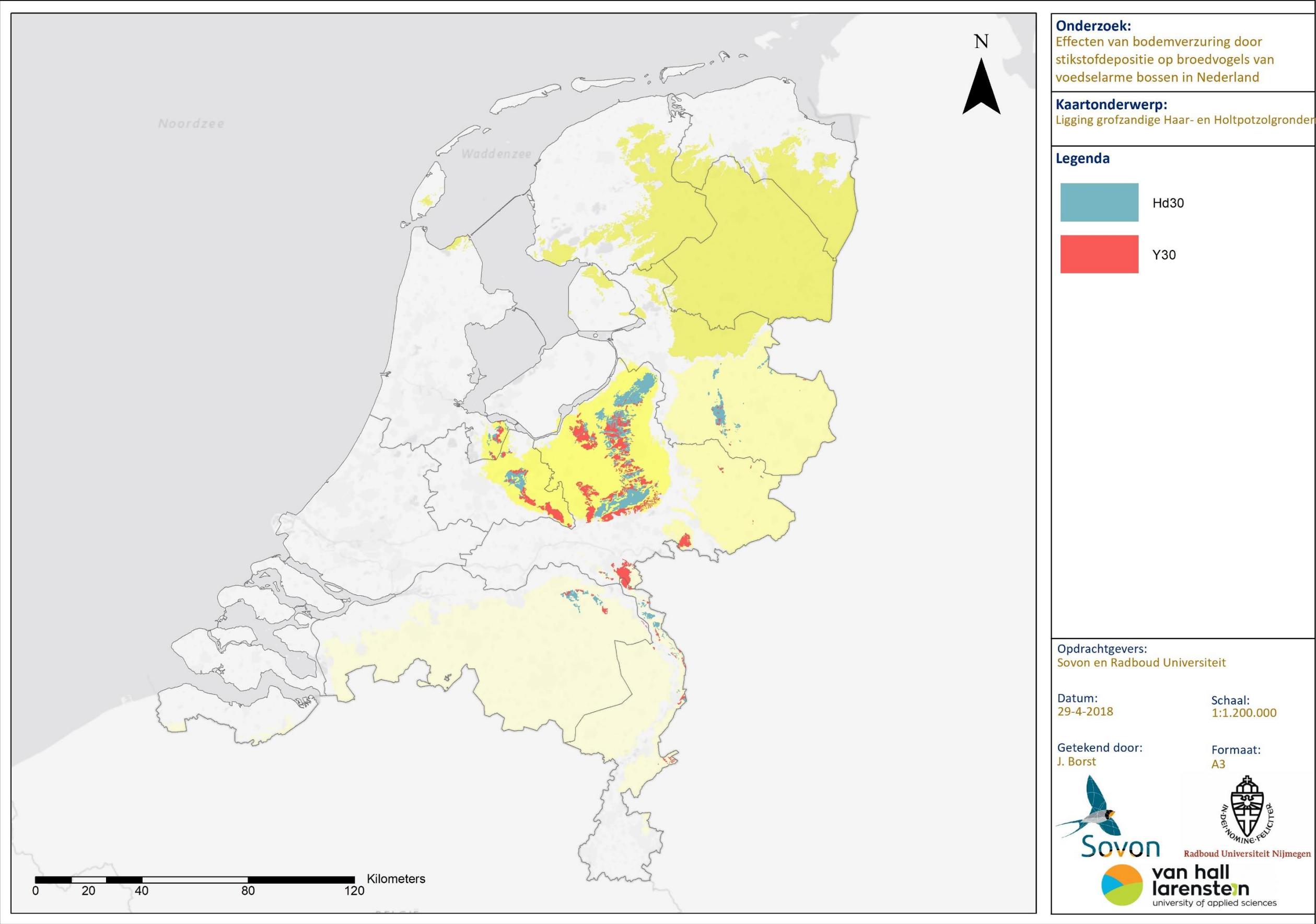
- Vergeer J.W., van Dijk A.J., Boele A., van Bruggen J. & Hustings F. (2016). *Handleiding Sovon broedvogelonderzoek: Broedvogel Monitoring Project en Kolonievogels*. Sovon Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen.
- Wäreborn, I. (1992). Changes in the Land Mollusk Fauna and Soil Chemistry in an Inland District in Southern Sweden. *Ecography*, 15(1), 62–69. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1992.tb00009.x>
- White, E.R. (2017). Minimum time required to detect population trends: the need for long-term monitoring. PeerJ preprints. 10.7287/peerj.preprints.3168v1.
- Wilkin, T. A., Gosler, A. G., Garant, D., Reynolds, S. J., & Sheldon, B. C. (2009). Calcium effects on life-history traits in a wild population of the great tit (*Parus major*): Analysis of long-term data at several spatial scales. *Oecologia*, 159(2), 463–472. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1222-8>
- Wilmot, M., de Heer, M. (2014) AERIUS, rekeninstrument voor aanpak stikstofproblematiek. *Tijdschrift Milieu*, 1-2014.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N. and Elphick, C. S. (2010), A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1: 3-14.

Bijlagen

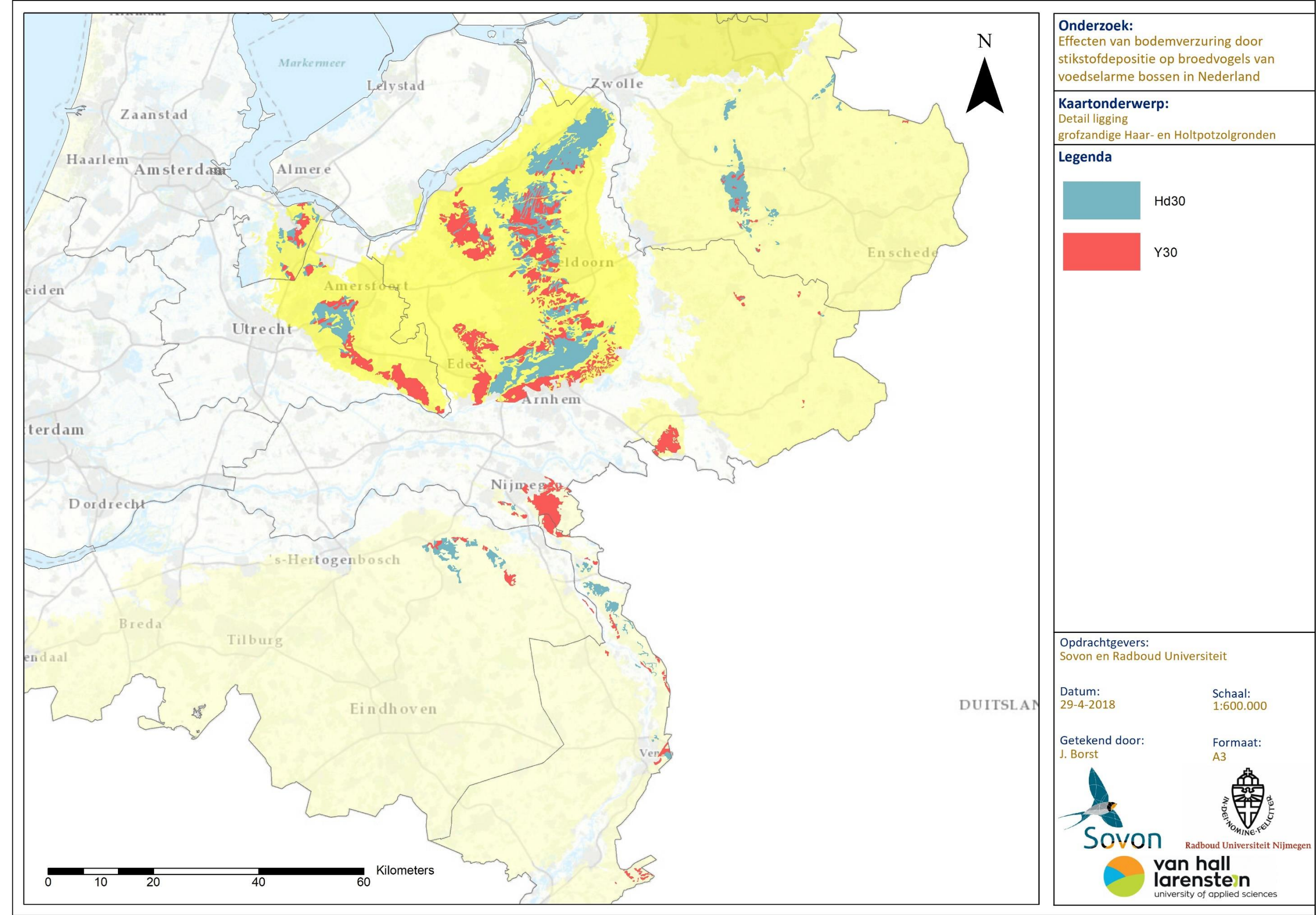
Bijlage 1: Ligging hoge zandgronden in Nederland



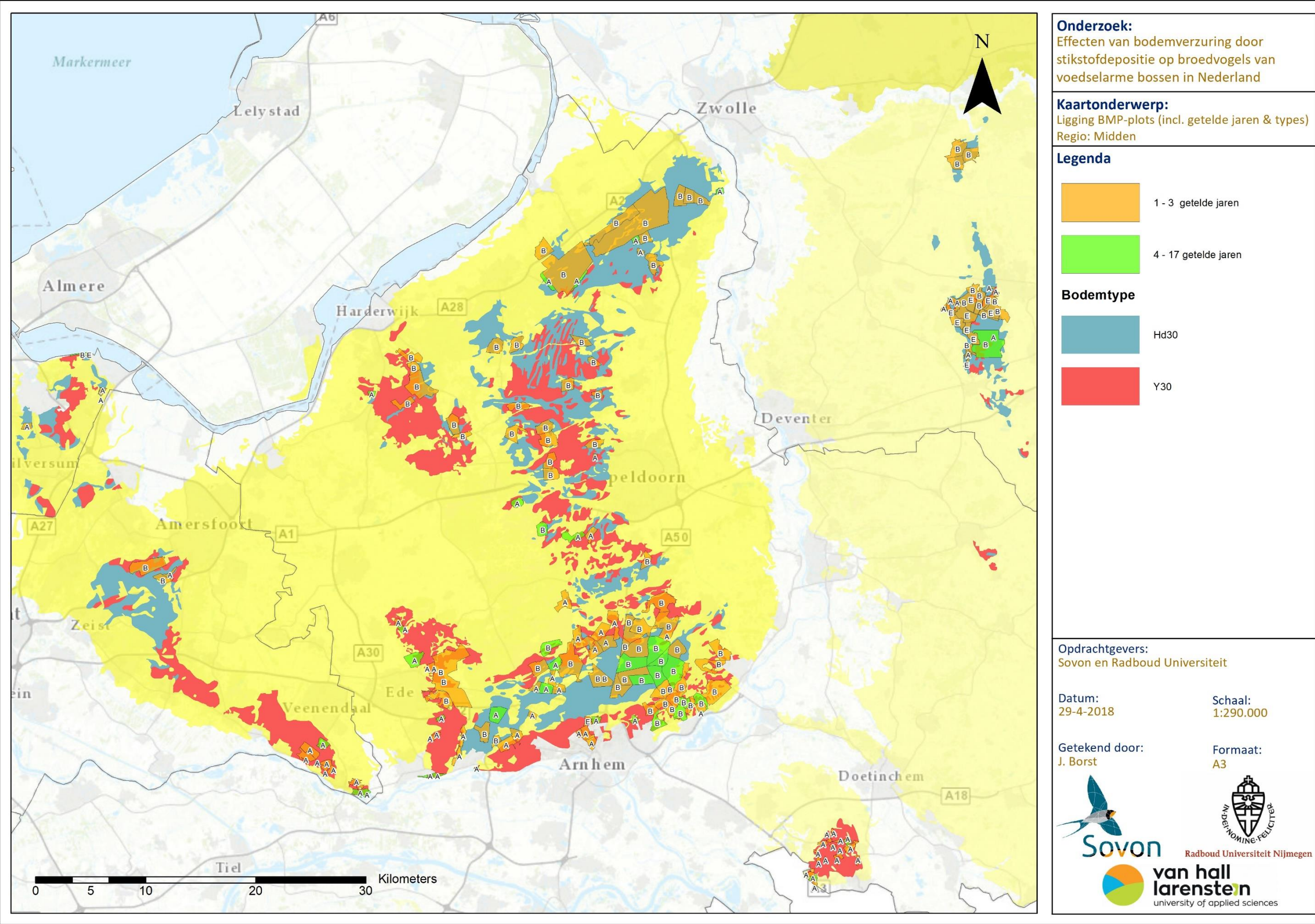
Bijlage 2: Ligging haarpodzolgronden en bruine bosgronden in Nederland



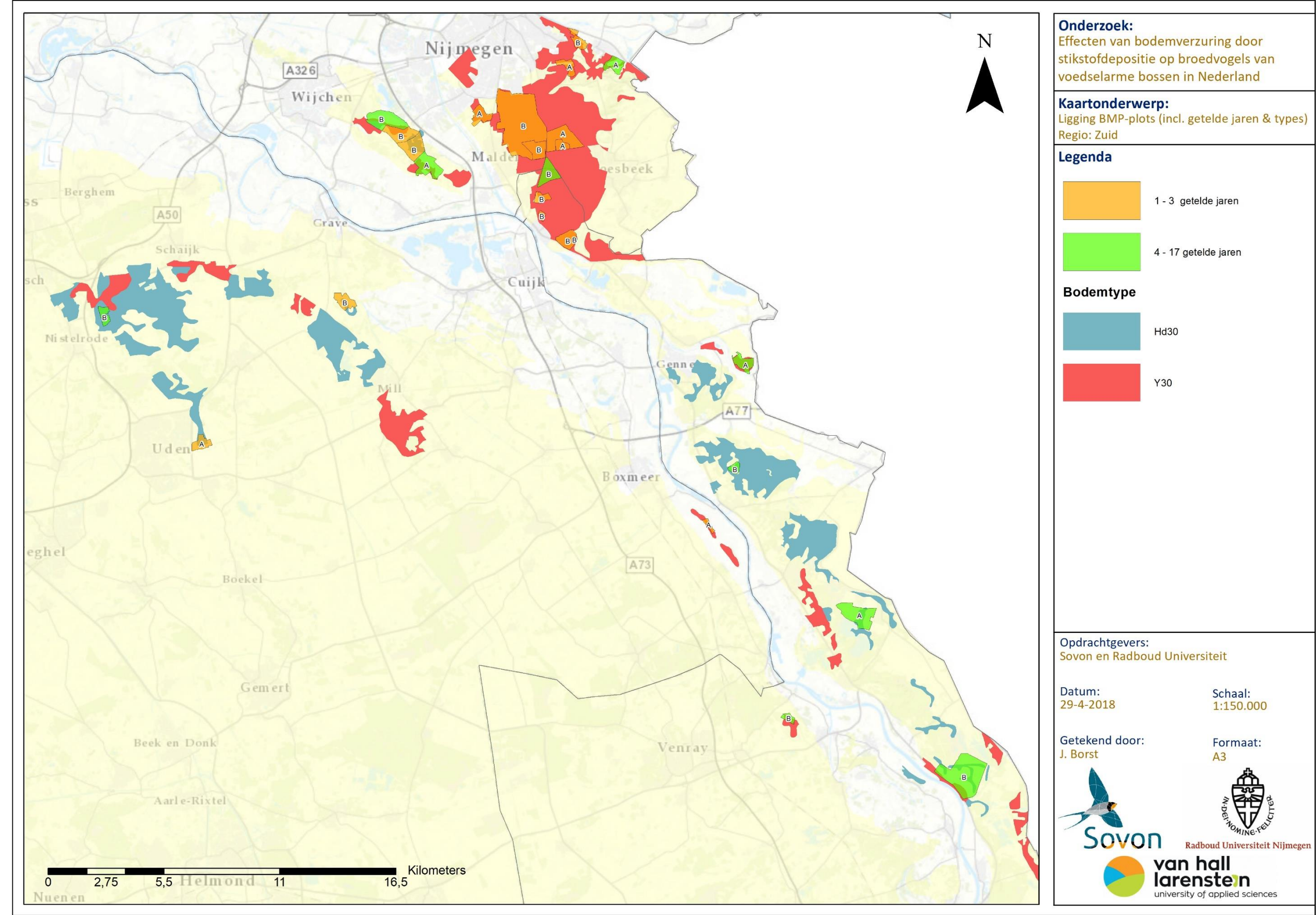
Bijlage 3: Detailbeeld ligging haarpodzolgronden en bruine bosgronden in Nederland



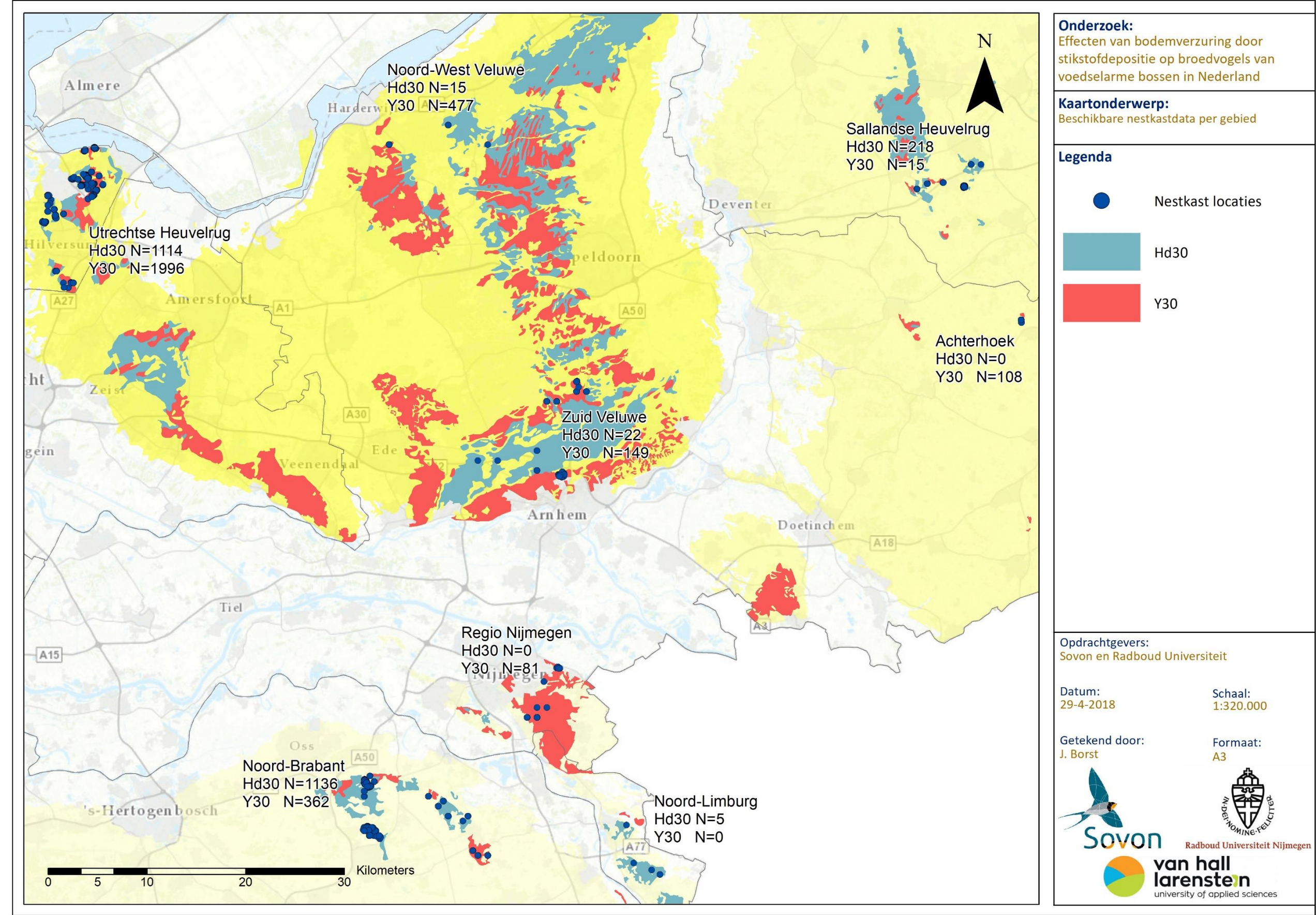
Bijlage 4: Ligging BMP-plots, regio Midden



Bijlage 5: Ligging BMP-plots, regio Zuid



Bijlage 6: Ligging nestkasten



Bijlage 7: Toelichting 'Statistische Power'

Statistische power wordt in het Nederlands ook wel 'onderscheidend vermogen' genoemd. In de statistiek wordt gebruik gemaakt van de toetsingstheorie. Binnen deze theorie zijn *significantie* en *power* belangrijke begrippen die bepalen of men de nulhypothese kan al dan niet kan verwerpen. Als grens voor het wel of niet significant zijn van een onderzoeksresultaat, wordt over het algemeen een p-waarde van 5% gekozen. Dit komt erop neer dat in 5% van de gevallen de nulhypothese wordt verworpen, terwijl deze waar is. Hierbij is niet bekend of de nulhypothese waar is of niet, maar men accepteert een fout van 5%. Dit noemt men een *type I-fout*. Het is echter ook mogelijk dat de nulhypothese niet wordt verworpen, terwijl zij niet waar is. De p-waarde is dan groter dan 5%. Dit noemt men een *type II-fout*. Met de term power wordt de kans bedoeld dat een significantietest de nulhypothese terecht verwerpt gegeven dat de alternatieve hypothese waar is. Een hoge power betekent dat de toets accuraat en nauwkeurig is. De power kan verhoogd worden door de steekproef te vergroten, de standaarddeviatie te verkleinen of de p-waarde te verhogen.

Voorbeeld:

- De nulhypothese (H0) luidt: 'Er is **geen** verschil tussen de populatietrends van broedvogels op Hd30-bodems en op Y30-bodems.'
- De alternatieve hypothese (H1) luidt: 'Er is **een** verschil tussen de populatietrends van broedvogels op Hd30-bodems en op Y30-bodems.'

Indien men probeert het verschil in populatietrends te onderzoeken met 2 BMP-plots op bodemtype Hd30 en 28 BMP-plots op bodemtype Y30, dan genereert dit een p-waarde boven de 5%. De conclusie zou dan zijn dat de nulhypothese niet verworpen mag worden; er is dus geen statistisch significant verschil tussen de populatietrends van broedvogels op Hd30-bodems en Y30-bodems. Echter, met een steekproef van 2 plots voor Hd30-bodems *kán* men geen statistisch significant verschil aantonen, zelfs als er in de werkelijkheid wel een verschil is tussen de populatietrends op de twee bodemtypen. De conclusie is dan ook onterecht; in de werkelijkheid kan er wel degelijk een verschil zijn en de nulhypothese is niet waar. Om het verschil statistisch zichtbaar te maken en de nulhypothese te kunnen verwerpen, is een grotere steekproef nodig ofwel: een hogere statistische power.

Bron: Twisk, J.W.R. (2007) *Inleiding in de toegepaste biostatistiek*. Elsevier, Maarssen.

Bijlage 8: Keuze voor lineaire en logistische regressieanalyse

In de statistiek zijn de kenmerken van de variabelen bepalend voor de statistische analysemethode die gekozen wordt. De gegevens over broedsucces in dit onderzoek, zijn geanalyseerd met behulp van twee modellen. Een model is een theoretische en conceptuele weergave van de werkelijkheid, wat in dit geval betekent dat broedsucces wordt beschreven aan de hand van twee variabelen: het aandeel succesvolle nesten (bijvoorbeeld: van de twintig nesten waren er zeven succesvol) en het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest (bijvoorbeeld: per succesvol nest vlogen er bij pimpelmezen gemiddeld 9 jongen uit).

Model 1

Het aandeel succesvolle nesten is een dichotome variabele. Dat betekent dat de variabele twee uitkomsten heeft: een nest is succesvol of niet. De kansverdeling die hoort bij een situatie waarbij er maar twee mogelijkheden zijn, wordt een binomiale kansverdeling genoemd. Wanneer men de relatie wil analyseren tussen een dichotome onafhankelijke variabele (bodemtype: Hd30 en Y30) en een dichotome afhankelijke variabele (nestsucces: succes/geen succes), dan kan men dat doen door een kruistabel te maken en door middel van de Chi-kwadraattoets te bepalen of er al dan niet een statistisch significant verschil is in nestsucces per bodemtype. Echter, wanneer men tegelijkertijd wil kunnen corrigeren voor andere factoren, zoals jaareffecten (een 'slecht' jaar kan de data sterk beïnvloeden), dan schiet de Chi-kwadraattoets tekort. In dat geval is logistische regressieanalyse nodig. Het idee achter logistische regressieanalyse is dat men de dichotome variabele zodanig transformeert (aan de hand van logaritmen), dat er een soort lineaire regressieanalyse mogelijk is.

Model 2

Het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest is een discrete variabele. Dat betekent dat de variabele alleen integere uitkomsten heeft; er bestaat geen 'half jong' en de mogelijke uitkomsten zijn altijd hele getallen. De kansverdeling die hoort bij een situatie waarbij er bijvoorbeeld minimaal 1 uitgevlogen jong is en maximaal 15, is wederom een binomiale verdeling. Echter, omdat in dit onderzoek een zeer grote steekproef beschikbaar is van honderden nesten, 'gedraagt' deze binomiale verdeling zich als een normale verdeling. De theorie die hierbij hoort, heet de theorie van de centrale limietstelling. Deze theorie wijst erop dat het toegestaan is om de variabele te analyseren aan de hand van een zogenaamde parametrische toets (Kwak & Kim, 2017). Een voorbeeld van zo'n toets is een t-toets. Echter, omdat in deze studie gecorrigeerd moet worden voor jaareffecten, was een t-toets niet afdoende en is lineaire regressieanalyse gebruikt voor de analyse.

De keuze van een statistische methode is een complex proces, waarbij veel stappen komen kijken. Bovenstaande beschrijving is nog geen complete weergave van het proces. In dit onderzoek werd het protocol van Zuur et al. (2010) gebruikt om tot de definitieve keuze van een statistische methode te komen. In bijlage 9 is in detail weergegeven hoe dit protocol toegepast is.

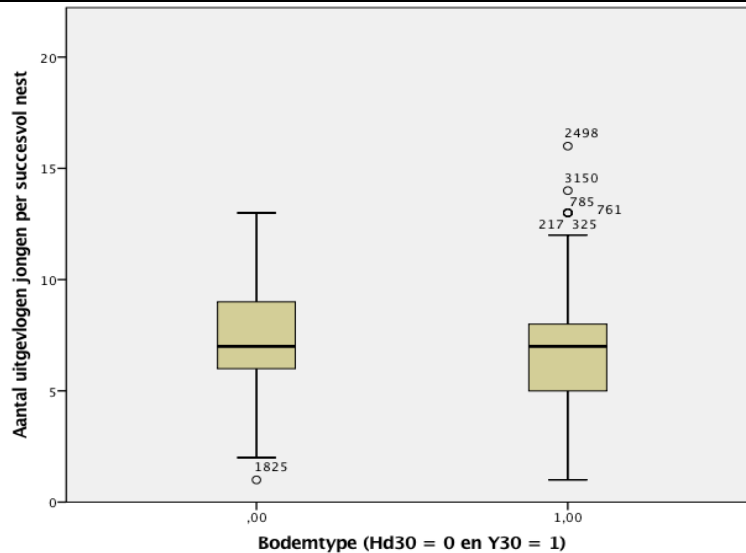
Bron: Twisk, J.W.R. (2007) *Inleiding in de toegepaste biostatistiek*. Elsevier, Maarssen.

Bijlage 9: Data-exploratie volgens het protocol van Zuur et al. (2010)

Onderstaande tabel toont de exploratie van de data voor het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest van de koolmees op 2 bodemtypen in midden-Nederland. Bij exploratie zijn de stappen uit het protocol van Zuur et al. (2010) gevolgd.

Stap	Toelichting
Selectie gemaakt op locatie: midden NL (want: Veluwe)	Aangezien wij de populatietrends van vogels van bossen op zandbodems willen kunnen vergelijken met de broedgegevens, hebben we moeten selecteren op regio. De populatietrends zijn gesplitst naar regio. Het zoekgebied betreft primair regio midden NL, omdat in regio Noord en Zuid te weinig Hd30- en Y30-bodems liggen (zie methode). Met dat argument zijn nesten uit andere regio's uitgesloten van analyse.
NA's e.d. verwijderd in excel	NA betekent Not Applicable. SPSS kan niet met dergelijke annotatie werken. Alle NA-cellen zijn vervangen door lege cellen.
Selectie op de koolmees	De analyse voeren wij per soort uit. Data > Select Cases > If condition is satisfied > soort = "Koolmees"
Selectie op nesten met minimaal 1 jong.	Indien niet succesvol zijn er nul jongen. Als al die nesten meegenomen worden, geeft dat geen realistisch beeld van het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest. Voor broedsucces worden 2 analyses apart van elkaar gemaakt: - Aandeel succesvolle nesten - Aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest Data > Select Cases > If condition is satisfied > soort = "Koolmees" & uitgevlogde >= 1
Selectie op habitat	Verwijdering van nesten in niet relevante habitats: bebouwing, woonwijk met veel beplanting en onbekend. Uiteindelijke selectie: Data > Select Cases > If condition is satisfied > soort = "Koolmees" & (uitgevlogen >= 1) & (habitat = "BOS/PARK" habitat = "gemengd bos" habitat = "heide binnenland" habitat = "loofbos" habitat = "naaldbos" habitat = "tuin in buitengebied")
Vaststellen van het meetniveau van de centrale variabelen	Bodemtype is een kwalitatieve, dichotome, nominale variabele. Categorieën zijn: Hd30 en Y30. De variabele is omgezet naar een numerieke variabele om analyse te vergemakkelijken: Codering daarbij: Hd30 = 0 Y30 = 1 Aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest is een kwantitatieve, discrete variabele waarin een bepaalde rangorde zit. In de analyse kan desondanks besloten worden om de variabele te behandelen als een continue variabele om analyse met parametrische technieken mogelijk te maken. De reden hiervoor is gelegen in het feit dat er per uitkomst (bijv. 1 jong of 4 jongen) vele observaties zijn gedaan (centrale limietstelling, zie bijlage 8) en dat 1 eenheid aan verandering steeds hetzelfde effect heeft (m.a.w. het verschil tussen 2 en 3 jongen is even groot als het verschil tussen 6 en 7 jongen).

Exploratie stap 1*.
Bepalen of er sprake
is van 'outliers'



Beschouwing

Hd30:

399 succesvolle nesten van de koolmees op Hd30-bodems
Gemiddeld aantal jongen op Hd30: $7,113 \pm 2,245$
(95%BI rond gemiddelde: 6,90 – 7,35)
Mediaan aantal jongen op Hd30: 7 IQR: 6-9 Range 1-13
Modus: 8

Outliers: 1 nest (1825)

1825: nest uit 2011 met daarin 1 uitgevlogen jong

Y30:

819 succesvolle nesten van de koolmees op Y30-bodems
Gemiddeld aantal jongen op Y30: $6,73 \pm 2,381$
(95%BI rond gemiddelde: 6,56 – 6,89)
Mediaan aantal jongen op Y30: 7 IQR: 5-8 Range 1-16
Modus: 6

Outliers: 6 nesten (818, 785, 761, 325, 3150, 2498)

325: nest uit 2014 met daarin 13 uitgevlogen jongen
761: nest uit 2010 met daarin 13 uitgevlogen jongen
785: nest uit 2010 met daarin 13 uitgevlogen jongen
818: nest uit 2010 met daarin 13 uitgevlogen jongen
2498: nest uit 2013 met daarin 16 uitgevlogen jongen
3150: nest uit 2017 met daarin 14 uitgevlogen jongen

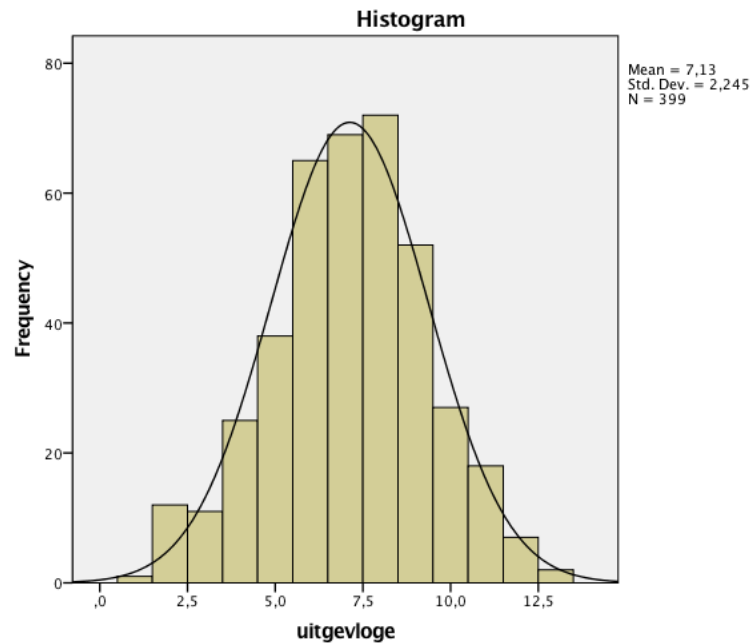
Conclusie

In zowel de Hd30- als de Y30-set zitten outliers. In de Hd30-set betreft dit 1 outlier aan de onderkant (exteem weinig uitgevlogen jongen), in de Y30-set betreft dit 6 outliers aan de bovenkant (exteem veel uitgevlogen jongen). Hier zitten geen cijfers tussen die wijzen op meet- of invoerfouten. Bovendien is niet te verwachten dat deze outliers de gemiddelde waarde van het aantal uitgevlogen jongen sterk zullen vertekenen, omdat de dataset daar te groot voor is.

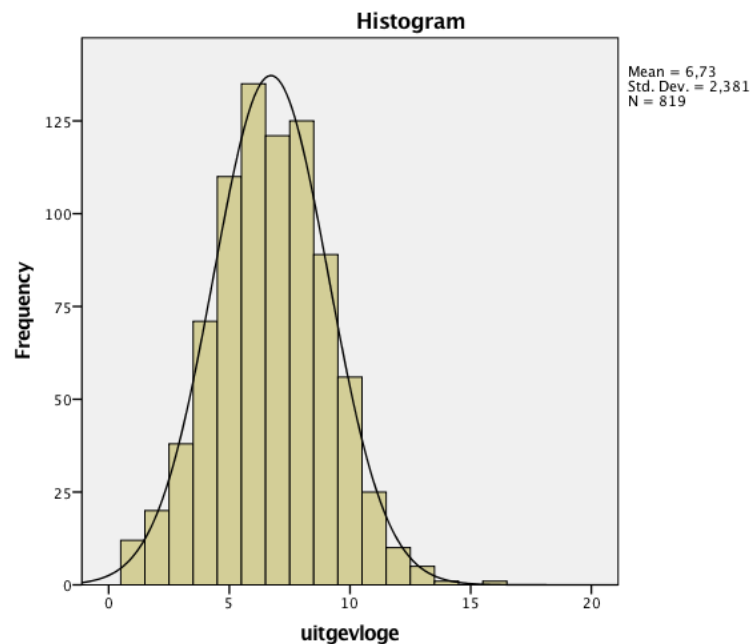
Exploratie stap 2. Bepalen of er voldoende homogeniteit in variantie is	De variantie voor Hd30 = 5,040 De variantie voor Y30 = 5,669 Conclusie Zowel in cijfers als ook in de boxplot is te zien dat de variantie van het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest per bodemtype in sterke mate overlapt.
Exploratie stap 3. Bepalen of de data normaal verdeeld zijn	Aard van de variabelen: - Bodemtype: dichotoom, nominaal. - Aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest: discreet, rangorde (evt. continu) Bovenstaande leidt tot een binomiale verdeling van het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest per bodemtype. Echter, vanwege de steekproefgrootte, kan ervoor gekozen worden om uit te gaan van een normale verdeling (volgens de theorie van de centrale limietstelling, zie bijlage 8). Daarom is het zinvol om te checken of de data normaal verdeeld zijn: Beschouwing van de gemiddelden per bodemtype in vergelijking met de mediaan per bodemtype Hd30 (n=399): Gemiddeld aantal jongen op Hd30: $7,113 \pm 2,245$ Mediaan aantal jongen op Hd30: 7 IQR: 6-9 Range 1-13 Y30 (n=819): Gemiddeld aantal jongen op Y30: $6,73 \pm 2,381$ Mediaan aantal jongen op Y30: 7 IQR: 5-8 Range 1-16 Conclusie: - Op Hd30-bodems is het gemiddelde (7,113) groter dan de mediaan (7), wat duidt op een verdeling die scheef naar rechts is. - Op Y30-bodems is het gemiddelde (6,73) kleiner dan de mediaan (7), wat duidt op een verdeling die scheef naar links is. Beschouwing van de gemiddelden per bodemtype ten op zichte van de grootte van de standaarddeviaties per bodemtype Gemiddeld aantal jongen op Hd30: $7,113 \pm 2,245$ Gemiddeld aantal jongen op Y30: $6,73 \pm 2,381$ Conclusie: - Op Hd30-bodems is het gemiddelde $\pm 2x$ de standaarddeviatie een range van 2,623 – 11,603 en deze uiterste waarden liggen nog keurig in de range van mogelijke waarden: 1-13. Dit pleit voor een normale verdeling. - Op Y30-bodems is het gemiddelde $\pm 2x$ de standaarddeviatie een range van 1,968 – 11,492 en deze uiterste waarden liggen nog keurig in de range van mogelijke waarden: 1-16. Dit pleit voor een normale verdeling.

Beschouwing van de mate waarin de histogrammen per bodemtype een normale verdeling laten zien

Verdeling van het aantal uitgevlogen jongen op bodemtype Hd30:



Verdeling van het aantal uitgevlogen jongen op bodemtype Y30:



Conclusie: De bovenstaande histogrammen laten zien dat de data redelijk klokvormig (=normaal) verdeeld zijn. Vooral de verdeling voor Hd30 toont een unimodaal beeld, waar de verdeling op Y30 niet unimodaal is, maar toch ook niet strikt bimodaal. Dit is het gevolg van de discrete eigenschap die deze data bezit: het betreft tellingen. Daarbij is er nooit sprake van een

	'half jong' en bewegen de waarnemingen zich over de x-as in stappen van 1. Beschouwing van de skewness per bodemtype Skewness Hd30: -0,121 (SE 0,122) Skewness Y30: 0,067 (SE 0,085) Conclusie bij de interpretatie van de 'skewness': om te kunnen spreken van een normale verdeling moet de waarde van skewness binnen de grenzen van ± 2 liggen; de skewness kent een normale verdeling met grenzen bij $\pm 1,96$ (Trochim & Donnelly, 2006; Field, 2000 & 2009; Gravetter & Wallnau, 2014). Dat is bij beide bodemtypen het geval. De waarden liggen zelfs behoorlijk dichtbij nul. Bij een skewness van $\pm 0,5$ mag gesteld worden dat de verdeling bij benadering symmetrisch is en dus normaal verdeeld. Dat is bij beide bodemtypen het geval. Wel is te zien aan de negatieve waarde van de skewness van Hd30 dat de verdeling scheef naar rechts is, terwijl de positieve waarde bij Y30 betekent dat de verdeling scheef naar links is. Bronnen: Trochim, W. M., & Donnelly, J. P. (2006). The research methods knowledge base (3rd ed.). Cincinnati, OH: Atomic Dog. Gravetter, F., & Wallnau, L. (2014). Essentials of statistics for the behavioral sciences (8th ed.). Belmont, CA: Wadsworth. Field, A. (2000). Discovering statistics using SPSS for Windows. London-Thousand Oaks- New Delhi: Sage publications. Field, A. (2009). Discovering statistics using SPSS. London: SAGE. Beschouwing van de kurtosis per bodemtype Kurtosis Hd30: -0,104 (SE: 0,244) Kurtosis Y30: -0,010 (SE: 0,171) Conclusie: De hoogte van de kurtosis-waarde geeft de mate weer waarin er sprake is van één hoge, scherpe piek in de verdeling (zoals het geval bij een normale verdeling). Een hoge waarde indiceert een hogere scherpere piek. Bij een hoge kurtosis-waarde, beweegt de massa van de verdeling zich van de schouders van de verdeling naar het centrum en de staarten. Net als bij skewness heeft een normale verdeling een kurtosis van 0 ($\pm 1,96$). Hier is te zien dat de kurtosis dichtbij 0 ligt. Wat pleit voor een normale verdeling. De gegevens behorend bij bodemtype Y30 wijken hierin minder af dan de gegevens van bodemtype Hd30, wat het gevolg kan zijn van de sample grootte. Beschouwing aan de hand van normaliteitstests Kolmogorov-Smirnov test (H0: data normaal verdeeld): Hd30 Statistic: 0,098, df 399, Sig 0,000 Y30 Statistic: 0,091, df 819, Sig 0,000
--	---

Shapiro-Wilk test (H0: data normaal verdeeld):

Hd30

Statistic: 0,979, df 399, Sig 0,000

Y30

Statistic: 0,983, df 819, Sig 0,000

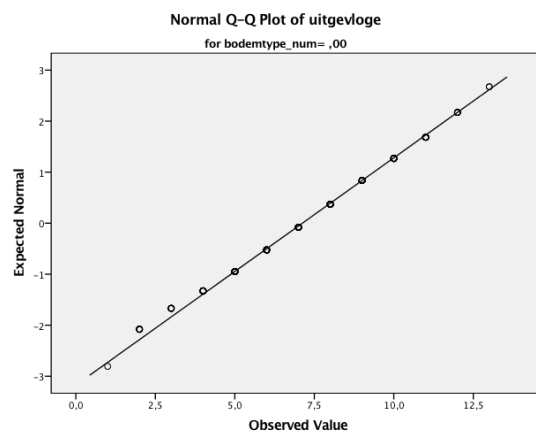
Conclusie: Bij normaliteitstests gaat men uit van H0: de data volgen een normale verdeling. Wanneer er een p-waarde van $<0,05$ gevonden wordt bij deze tests, wordt H0 verworpen. De conclusie is dan dat de data niet normaal verdeeld zijn. Bij grote samples heeft de Shapiro-Wilk test de voorkeur boven de Kolmogorov-Smirnov test, echter, bij grote samplesize zal zelfs de kleinste afwijking van de normaalverdeling al leiden tot een significant resultaat (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Het is daarom belangrijker om af te gaan op de visuele interpretatie van normaliteit (zie boxplots, histogrammen etc.).

Bron:

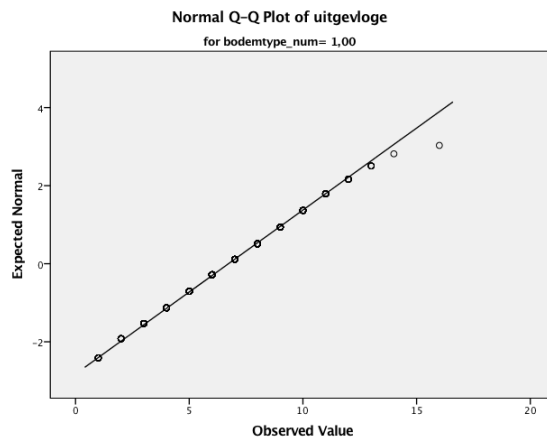
Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <http://doi.org/10.5812/ijem.3505>

Beschouwing van de Q-Q-plots

Q-Q-plot van Hd30:



Q-Q-plot van Y-30



Conclusie: Beide Q-Q-plots tonen aan dat de data mooi op een lijn liggen (op een enkel punt na); dit ondersteunt de conclusie dat de data voor beide bodemtypen normaal verdeeld zijn.

Beschouwing van de effecten van een logtransformatie

De variabele is getransformeerd (met Ln en Log10) en dit gaf grotere afwijkingen van de normale verdeling in vrijwel alle benaderingswijzen die hierboven gevolgd zijn.

Slotconclusie: Men mag ervan uitgaan dat de data voor aantallen uitgevlogen jongen per succesvol nest zowel voor bodemtype Hd30 als voor bodemtype Y30 bij benadering normaal verdeeld zijn. Het hoofdargument hierbij is gebaseerd op de centrale limietstelling. In het vervolg van de analyse wordt op grond van deze conclusie gekozen voor parametrische analysemethoden.

Exploratie stap 4.
Bepalen of de dataset wordt gedomineerd door nullen

De dataset wordt niet gedomineerd door nullen. De variabele 'aantallen uitgevlogen jongen per succesvol nest' bevat geen nullen, omdat alle nullen de niet-succesvolle nesten betreffen en deze zijn in een eerdere stap al uitgesloten van de analyse om problemen te voorkomen (zie boven).

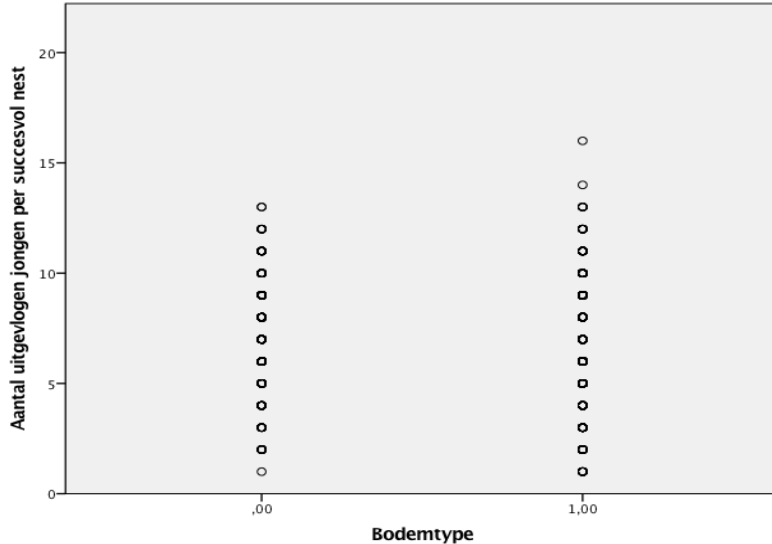
Exploratie stap 5.
Bepalen of er sprake is van collineariteit tussen covariaten

Collineariteit betreft de mate waarin covariaten met elkaar correleren (bijv. gewicht en lengte of waterdiepte t.o.v. kustlijn). In de onderstaande collineariteitsanalyse staan 3 variabelen:

- Bodemtype (dichotoom: Hd30, Y30)
- Habitat (categoriaal: arm = 0, middelmatig = 1, rijk = 2)
- Jaar (continu, 2000-2017)

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	170,588	41,105		4,150	,000		
	bodemtype_num	-,342	,142	-,069	-2,404	,016	,991	1,009
	habitat_num	-,210	,146	-,041	-1,432	,152	,991	1,009
	jaar	-,081	,020	-,114	-3,971	,000	,984	1,016

a. Dependent Variable: uitgevlogde

	Conclusie: De VIF ligt tussen 0 en 10. Daarmee kan geconcludeerd worden dat er geen sprake is van multicollineariteit. Op basis van logisch redeneren is ook niet te verwachten dat er sprake is van collineariteit tussen jaar en bodem of habitat. Wel tussen bodem en habitat, maar kennelijk niet in dien mate dat men hier in verdere analyses rekening mee hoeft te houden.
Exploratie stap 6. Wat zijn de relaties tussen Y en X variabelen?	Relatie bodemtype met aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest:  Conclusie: Bij het correleren van bodemtype en aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest wordt een Spearman's rho gevonden van -0,085, statistisch significant met $p = 0,003$. Dat betekent dat het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest op Y30 bodems statistisch significant lager ligt dan op Hd30-bodems. Het verschil in aantal uitgevlogen jongen is dus niet groot (rho benadert nul), maar wel statistisch significant. Relatie habitat met aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest: Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest op armste bodems (naaldbos, heide): $7,39 \pm 2,699$ Mediaan: 8 Range 12 Min-Max 1-13 Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest op armste bodems (gemengd bos, bos/park): $6,76 \pm 2,271$ Mediaan: 7 Range 13 Min-Max 1-14 Gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest op rijkste bodems (loofbos): $6,95 \pm 2,379$ Mediaan: 7 Range 15 Min-Max 1-16 Aangezien habitat een categoriale variabele is, kan deze niet gecorreleerd worden met aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest. Om toch een beeld te krijgen van een eventuele relatie tussen deze variabelen is een Oneway ANOVA uitgevoerd. Hierbij blijkt dat er sprake is van een statistisch significant verschil in het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest in de verschillende habitats.

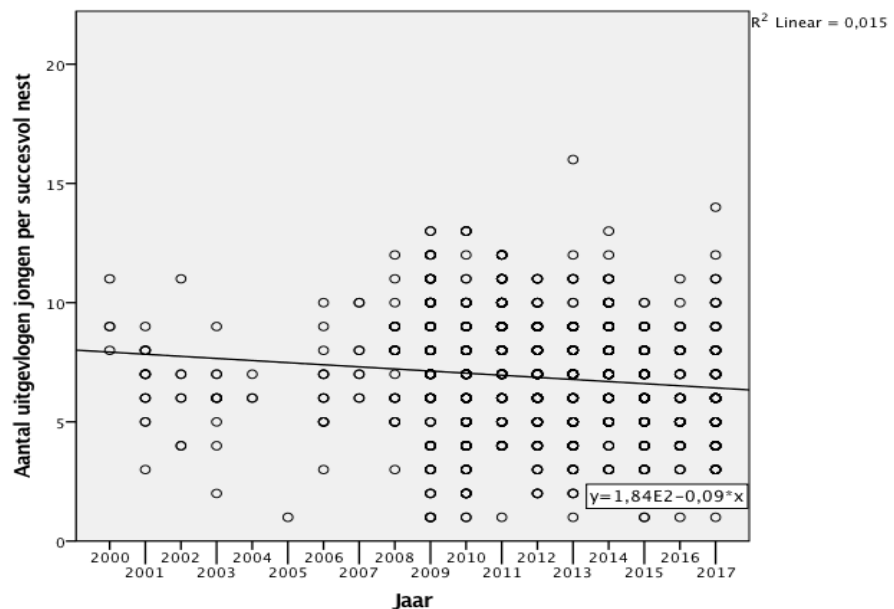
Sum of Squares: 51,502
Df: 2
Mean Square: 25,751
F: 4,716
Sig: 0,009

Met een Bonferroni correctie kan vervolgens worden bekeken waar de verschillen precies zitten. Hierbij blijkt het gemiddeld aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest alleen statistisch significant te verschillen tussen het armste habitat en het middelmatige habitat ($p = 0,007$). Tussen de overige habitats zitten geen statistisch significante verschillen. Dat kan ook het gevolg zijn van het feit dat er weinig rijke habitats in de steekproef zitten:

N uitgevlogen in 'arme' habitats: 150
N uitgevlogen in 'middelmatige' habitats: 963
N uitgevlogen in 'rijke' habitats': 105

Conclusie: Habitat lijkt samen te hangen met het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest, echter, dit verband wordt alleen gevonden als specifiek gekeken wordt naar de verschillen tussen arme en middelmatige habitats. Dat is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat er veel ruis geïntroduceerd is bij het categoriseren van de variabele habitat. Het blijft frapant om te zien dat koolmezen het beter te lijken doen qua aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest op arme bodems en in arme habitats. Mogelijk kan dit verklaard worden door het feit dat jonge koolmezen en hu ouders hier minder concurrentie ondervinden van andere soorten?

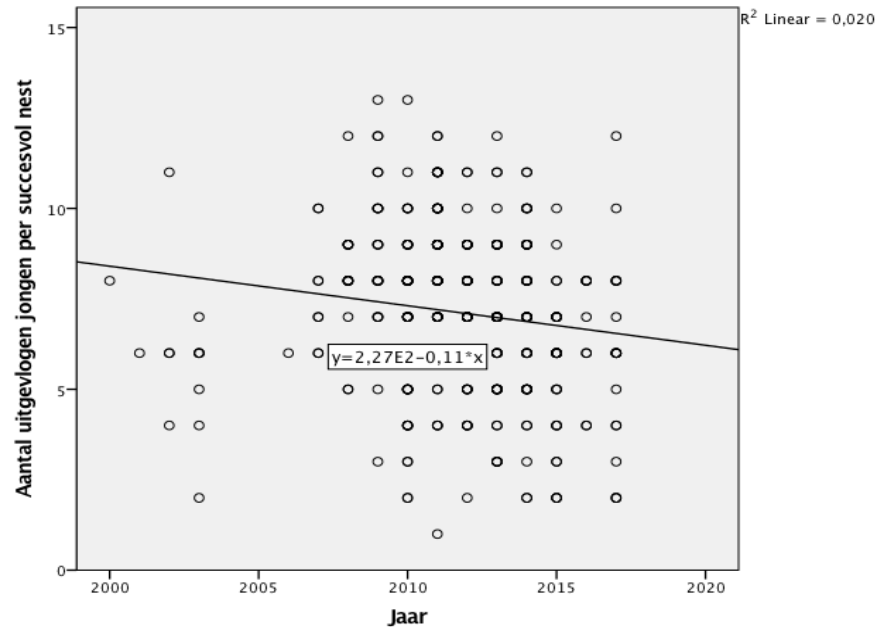
Relatie aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest met jaar:



Conclusie: Bij het correleren van jaar en aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest zien we dat er sprake is van een negatieve correlatie:

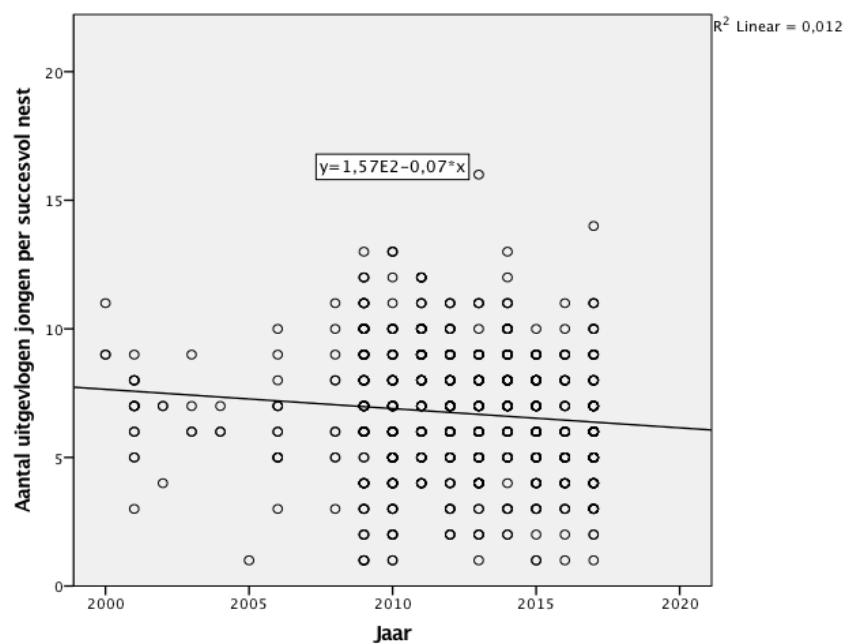
gedurende de jaren zijn er minder jongen uitgevlogen per succesvol nest (niet opgesplitst naar bodemtype!). $r = 0,122$, $r^2 = 0,015$.

Relatie aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest met jaar voor bodemtype Hd30:



Conclusie: Bij het correleren van jaar en aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest voor bodemtype Hd30 zien we dat er sprake is van een negatieve correlatie: gedurende de jaren zijn er minder jongen uitgevlogen per succesvol nest. ($r = -0,142$, $r^2 = 0,020$)

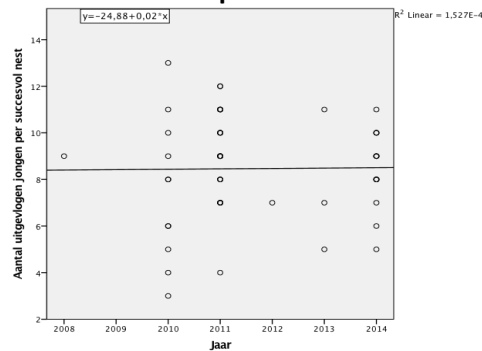
Relatie aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest met jaar voor bodemtype Y30:



Conclusie: Bij het correleren van jaar en aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest voor bodemtype Y30 zien we dat er sprake is van een negatieve correlatie: gedurende de jaren zijn er minder jongen uitgevlogen per succesvol nest. ($r = -0,110$, $r^2 = 0,012$)

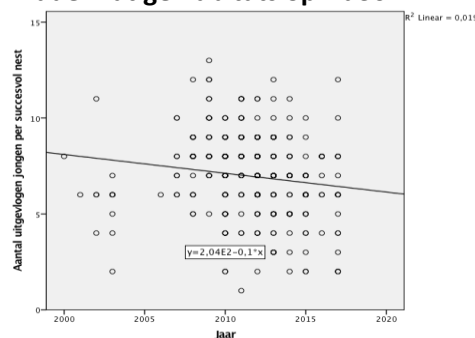
Relatie aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest met jaar voor bodemtype Hd30 in 3 typen habitats (Spearman's Rho gebruikt voor correlatie):

Armste habitats op Hd30:



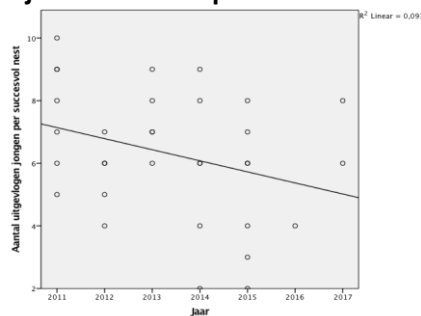
Conclusie: vrijwel gelijkblijvend aantal jongen per succesvol nest ($r = 0,035$, $p = 0,799$; trend dus eerder stijgend dan dalend, maar geen statistisch significante achteruitgang aangetoond bij $n = 56$ nesten).

Middelmatige habitats op Hd30:



Conclusie: dalend aantal jongen per succesvol nest ($r = -0,199$, $p = -,000$); statistisch significante afname van aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest (bij $n = 310$ nesten).

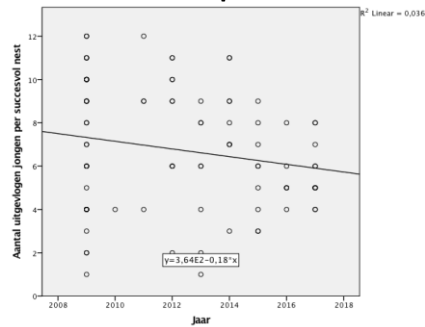
Rijkste habitats op Hd30:



Conclusie: dalend aantal jongen per succesvol nest ($r = -0,319$, $p = -,071$); maar geen statistisch significante achteruitgang aangetoond bij $n = 33$ nesten.

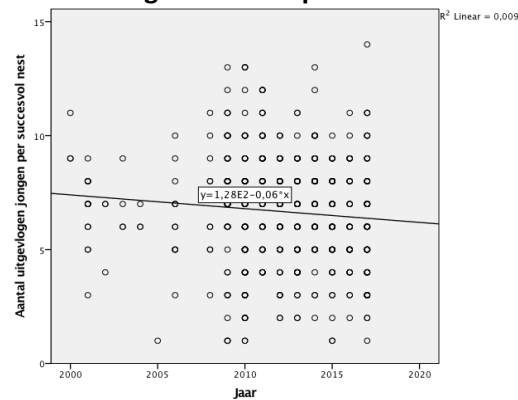
Relatie aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest met jaar voor bodemtype Y30 in 3 typen habitats (Spearman's Rho gebruikt voor correlatie):

Armste habitats op Y30:



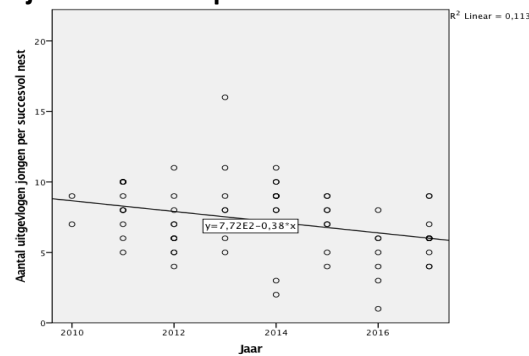
Conclusie: dalend aantal jongen per succesvol nest ($r = -0,194$, $p = 0,061$); trend dalend, maar geen statistisch significante achteruitgang aangetoond bij $n = 94$ nesten.

Middelmatige habitats op Y30:



Conclusie: dalend aantal jongen per succesvol nest ($r = -0,112$, $p = 0,004$); statistisch significante afname van aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest (bij $n = 653$ nesten).

Rijkste habitats op Y30:

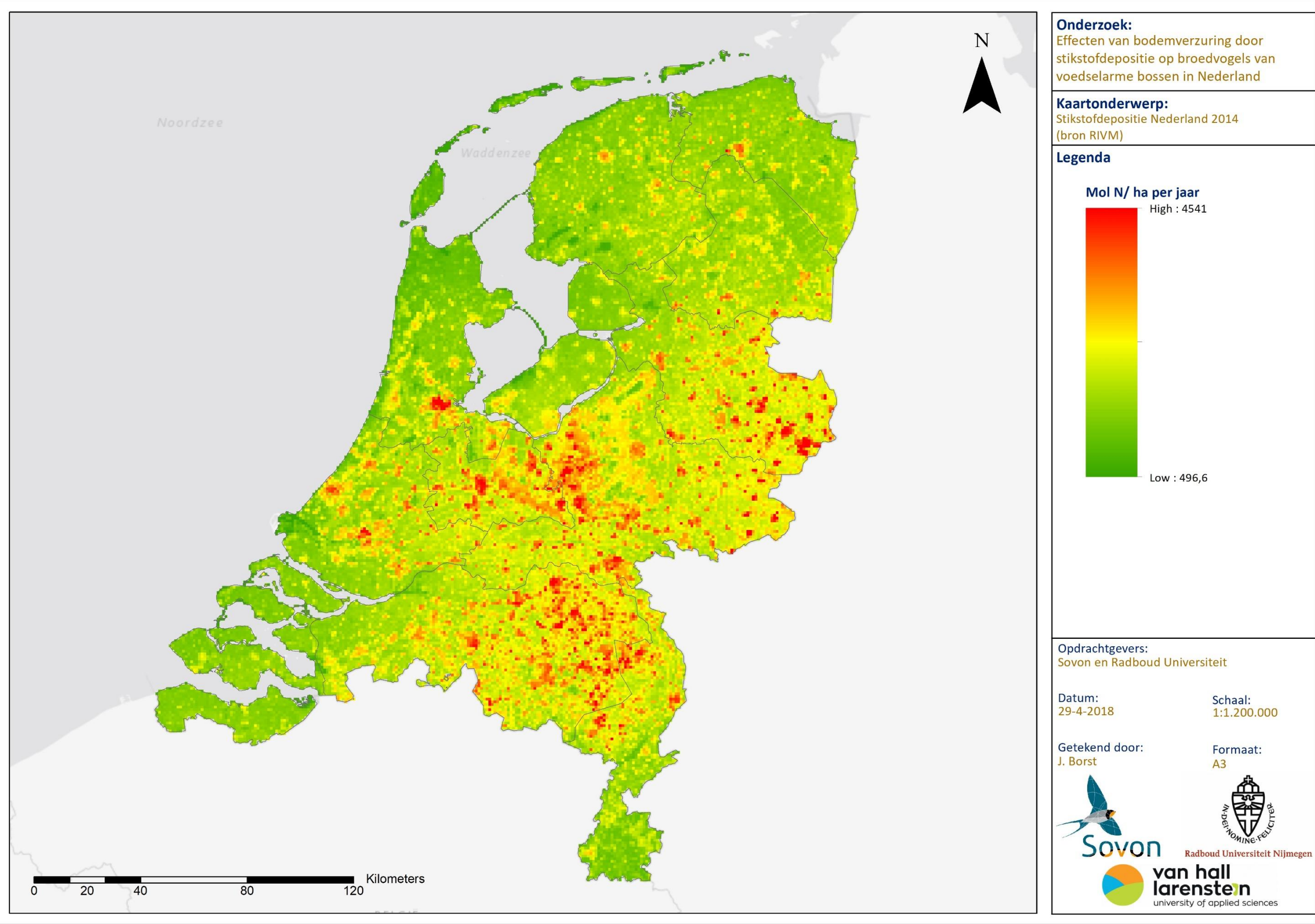


Conclusie: dalend aantal jongen per succesvol nest ($r = -0,354$, $p = 0,002$); statistisch significante afname van aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest (bij $n = 72$ nesten).

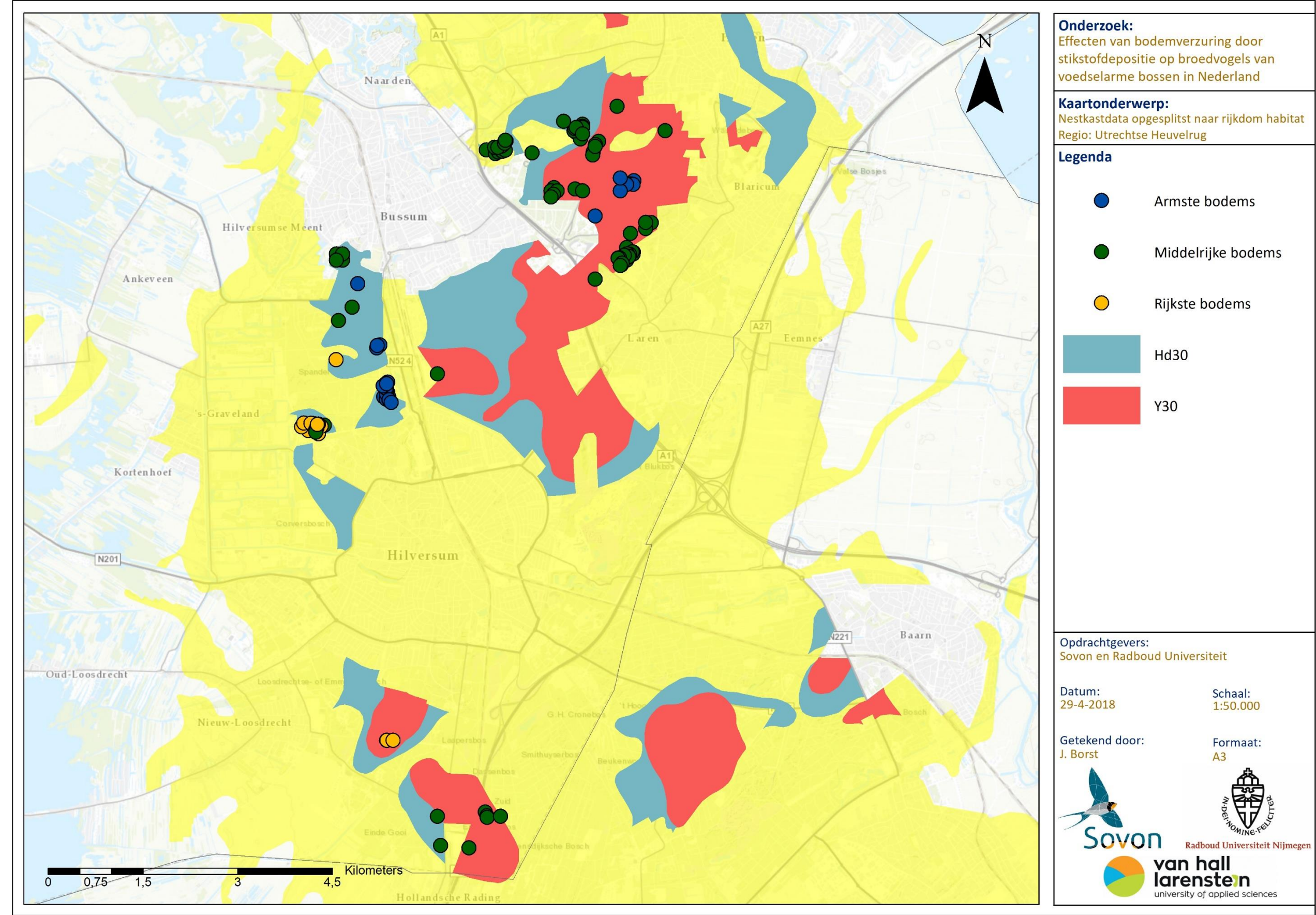
	Overkoepelende conclusie: Het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest ligt op Hd30-bodems en in arme habitats (zoals naaldbos) gek genoeg wat hoger dan op Y30-bodems en in rijkere habitats (zoals gemengd bos). Het aantal uitgevlogen jongen per succesvol nest gaat op beide bodemtypen (Hd30 en Y30) langzaam achteruit in de periode 2000-2017; deze achteruitgang gaat harder op Hd30-bodems, dan op Y30-bodems. Op Hd30-bodems met arme habitats lijkt geen sprake te zijn van een afname van aantallen uitgevlogen jongen per succesvol nest lager te liggen, terwijl dat in rijkere habitats wel het geval lijkt te zijn. Op Y30-bodems met arme habitats kan geen statistisch significante achteruitgang aangetoond worden, maar op Y30-bodems met middelmatig-rijke habitats is sprake van statistisch significante achteruitgang van aantallen uitgevlogen jongen per succesvol nest. Kortom: bij een rijker habitat en bodemtype lijkt de trend juist negatiever te zijn.
Exploratie stap 7. Kan er sprake zijn van interacties?	Op basis van de output onder stap 6, zou je kunnen verwachten dat er mogelijk een interactie is tussen bodemtype en habitat. Dat is in deze dataset slecht te onderzoeken, vanwege de dominantie van de habitat 'gemengd bos'.
Exploratie stap 8. Zijn de observaties van de uitkomstvariabele werkelijk onafhankelijk?	Hoewel de kans groot is dat in achtereenvolgende jaren dezelfde vogels geteld worden, is er geen sprake van afhankelijkheid tussen de observaties.

* Voor exploratie van de dataset is gebruik gemaakt van het protocol van Zuur et al., 2010 (Zuur, A. F., Ieno, E. N. and Elphick, C. S. (2010), A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1: 3-14.)

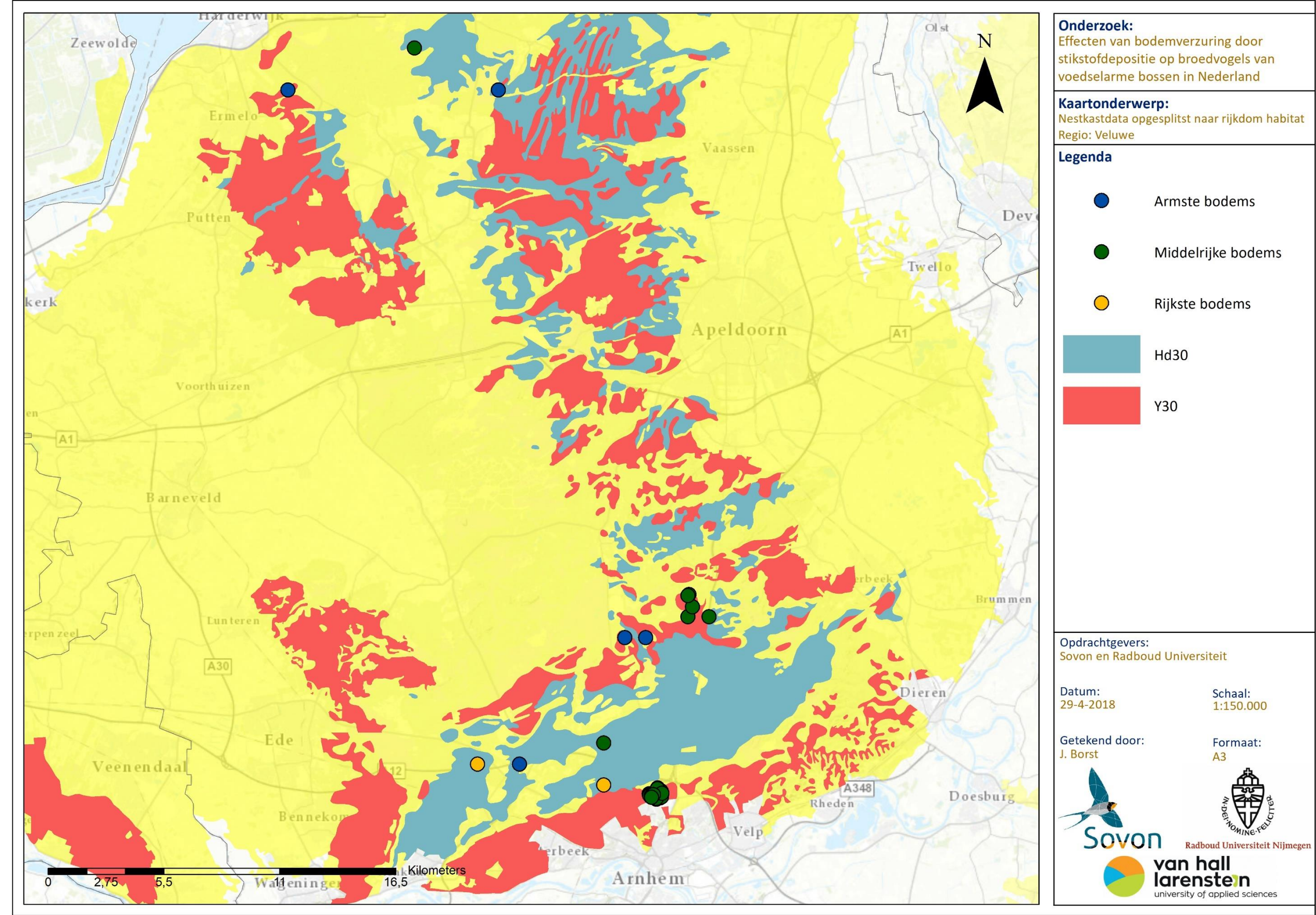
Bijlage 10: Stikstofdepositie in Nederland



Bijlage 11: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Utrechtse heuvelrug)



Bijlage 12: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Veluwe)



Bijlage 13: Spreiding nestkasten opgesplitst naar habitat (Salland en Achterhoek)

