VLAAMSE
LAND
MAATSCHAPPIJ

INVLOED VAN PH EN BEKALKING OP STIKSTOFBEMESTING, -NITRAATRESIDU EN -UITSPOELING

VOLGENS BESTEK NR. APLM/2018/5

Eindrapport

Publicatiedatum: 14.08.2019

INHOUD

1 Samenvatting 9
2 Inleiding 12
3 Aanpak 13
4 Onderdeel 1: Literatuurstudie 14
4.1 Overzicht classificaties en streefzones in functie van grondsoort en teelt 14
4.1.1 Achtergrond 14
4.1.2 Geraadpleegde bronnen 14
4.1.3 Wettelijk kader 15
4.1.4 Staalname 16
4.1.5 Meting 16
4.1.6 Optimale pH en streefzones op basis van grootschalig bekalkingsonderzoek 18
4.1.7 Invloed pH op teeltopbrengsten 25
4.1.8 Leverbaarheden: optimale pH en invloed pH op de teeltopbrengst 25
4.2 Invloed van bodem-pH op stikstofefficiëntie, stikstofuitspoeling en nitraatresidu, kwantificering 26
4.2.1 Bodem-N-balans 26
4.2.2 Nitraatresidu 31
4.2.3 N-uitspoeling 32
4.2.4 Leverbaarheden 32
4.3 Invloed van bekalking en bemesting op bodem-pH 32
4.3.1 Achtergrond 32
4.3.2 Kalksoorten en hun werking 33
4.3.3 Effect van meststoffen op de pH 35
4.3.4 Leverbaarheden 36
5 Onderdeel 2: Inschatting van het effect van de verbetering van de bodem-pH op de stikstofefficiëntie, stikstofuitspoeling en het nitraat-N-residu 37
5.1 Beschikbare data 37
5.1.1 Datasets 37
5.1.2 Teelten 38
5.2 Stap 1: Huidige situatie van de landbouwpercelen in Vlaanderen 38
5.2.1 Aanpak en gebruikte data 38
5.2.2 pH in Vlaanderen: historiek 38
5.2.3 pH in Vlaanderen: huidige situatie (van 2012 tot heden) 39
5.2.4 Nitraatresidu in Vlaanderen: historiek 49
5.2.5 Nitraatresidu in Vlaanderen: huidige situatie 52
5.2.6 Output - leverbaarheden 54

5.3 Stap 2: Verband tussen bodem-pH en stikstofefficiëntie 54
5.3.1 Aanpak en gebruikte data 54
5.3.2 Verband bodem-pH en N-bemestingsadviezen (verwachte stikstofefficiëntie) 54
5.3.3 Verband bodem-pH en gewasopname van stikstof (werkelijke stikstofefficiëntie) 54
5.3.4 Output - leverbaarheden 58
5.4 Stap 3: Statistisch verband tussen bodem-pH en nitraatresidu o.b.v. bodemanalyseresultaten 59
5.4.1 Aanpak 59
5.4.2 Gebruikte data 59
5.4.3 Data-screening: correlatie-analyse 61
5.4.4 Normaalverdeling en log-transformatie 62
5.4.5 Variantie-analyse pH-klassen 64
5.4.6 Regressie-analyse getransformeerde nitraatresidu's 69
5.4.7 General linear mixed model analyse op log-getransformeerde nitraatresidu's 74
5.4.8 Besluit 78
5.4.9 Output - leverbaarheden 78
5.5 Stap 4: Theoretische berekening N-uitspoeling tijdens de winter uit landbouwpercelen in Vlaanderen, huidige situatie 78
5.5.1 Aanpak 78
5.5.2 Gebruikte data 78
5.5.3 Berekening van de hoeveelheid nitraat-N in het bodemprofiel tijdens de winter 82
5.5.4 Berekening van de hoeveelheid nitraat-N die verder uitspoelt naar het grondwater 93
5.5.5 Output - leverbaarheden 97
5.6 Stap 5: Theoretische berekening N-uitspoeling tijdens de winter uit landbouwpercelen in Vlaanderen, "ideale" situatie pH 97
5.6.1 Aanpak 97
5.6.2 N-residu bij optimale pH 98
5.6.3 N-uitspoeling bij optimale pH 101
5.6.4 Output - leverbaarheden 103
6 Onderdeel 3: Aanbevelingen voor implementatie 104
6.1 Technische aspecten 104
6.1.1 Output en leverbaarheden 104
6.2 Kosten-batenanalyse - economische winst voor de landbouw 104
6.2.1 Aanpak 104
6.2.2 Huidige opbrengstderving op schaal Vlaanderen door sub-optimale pH 104
6.2.3 Nodige bekalkingshoeveelheid om alle percelen in Vlaanderen in de streefzone voor pH te brengen 108
6.2.4 Praktische implementatie 112
6.2.5 Output en leverbaarheden 116

7 Onderdeel 4: Conclusies 117
7.1.1 Output - leverbaarheden 119
8 Referenties 120
9 Bijlage: Optimale pH en streefzones in verschillende landen en regio's, volgens verschillende bronnen 124
9.1 Vlaanderen 124
9.1.1 Bodemkundige Dienst van België (akkers en weilanden) 124
9.1.2 Praktijkgids bemesting meststoffen en groenbedekkers (akkers en weilanden) 124
9.2 Wallonië 124
9.2.1 Requasud (akkers en weilanden) 124
9.3 Nederland 125
9.3.1 Handboek Bodem en Bemesting (akkers) 125
9.3.2 Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (weilanden) 129
9.4 Duitsland 129
9.4.1 Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (akkers en weilanden) 129
9.5 Verenigd Koninkrijk 131
9.5.1 Fertiliser Manual (RB209) (akkers en weilanden) 131
9.6 Denemarken 131
9.6.1 LandbrugsInfo SEGES (akkers) 131
9.7 US - North Carolina 132

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Onderdelen en leverbaarheden 13
Figuur 2: Seizoenschommeling van pH-water en pH-KCl van de bodem (bron: archieven BDB) 17
Figuur 3: Verband tussen pH-H2O en pH-KCl op basis van 354014 metingen in de periode 1975-1988 (bron: archieven BDB) 18
Figuur 4: Beschikbaarheid van de voedingselementen in functie van de pH (hier voor een zandgrond). Hoe breder de balk, hoe groter de beschikbaarheid bij de vermelde pH. (BAC, http//www.baconline.nl/downloads/ folders/element_en.pdf). 21
Figuur 5: Situering van de in Vlaanderen gehanteerde pH-streefzones (BDB) t.o.v. enkele andere landen en regio's in Europa en de US 24
Figuur 6: pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte 26
Figuur 7: Procentuele verdeling van de akkerbouw- (boven) en weiland- (onder) stalen in 7 beoordelingsklassen per fusiegemeente (eventueel opgesplitst naar landbouwstreek) voor de pH; gemeenten met minder dan 10 stalen worden niet getoond (Tits et al., 2016) 40
Figuur 8: Mediane pH-beoordelingsklasse van akker- (boven) en weiland- (onder) percelen per fusiegemeente*landbouwstreek voor de periode 2015-2018; gemeenten met minder dan 10 stalen worden niet getoond (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 42
Figuur 9: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen voor gans Vlaanderen (linksboven) en per landbouwstreek; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 43
Figuur 10: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen voor gans Vlaanderen (linksboven) en per landbouwstreek; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 44
Figuur 11: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen per provincie; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 45
Figuur 12: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen per provincie; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 46
Figuur 13: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen per bodemtextuurklasse; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 46
Figuur 14: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen per bodemtextuurklasse; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 47
Figuur 15: Procentuele verdeling van de bodemstalen in 7 beoordelingsklassen per teeltgroep, volgens de eerste teelt die volgt na de bodemstaalname; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018) 48
Figuur 16: Evolutie van het gewogen gemiddelde nitraatresidu, volgens de initiële en geactualiseerde berekeningswijze, bij de staalnamecampagne van de Mestbank (VLM, Nitraatresidurapport 2017) 49
Figuur 17: Gemiddelde neerslagoverschot (blauw) of -tekort (rood) te Ukkel tijdens het groeiseizoen (april tot augustus) in de jaren 2011 t/m 2018 (bron: KMI) 50
Figuur 18: Evolutie van het nitraatresidu van 2011 tot 2018, gemiddelden per fusiegemeente; op basis van de EVANIR-dataset BDB (links) en op basis van de dataset VLM (rechts) 51
Figuur 19: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per landbouwstreek o.b.v. de dataset VLM; de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer 52
Figuur 20: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per provincie o.b.v. de dataset VLM (boven) en o.b.v. de dataset BDB (onder); de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer 52
Figuur 21: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep o.b.v. de dataset VLM (boven) en o.b.v. de dataset BDB (onder); de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer 53
Figuur 22: Relatieve opbrengst i.f.v. pH-KCl voor enkele teelten, cijfers van de historische bekalkingsproeven van de BDB (bruine punten en lijnen) uitgezet t.o.v. de in Tabel 9 opgestelde vereenvoudigde responscurves (blauwe lijnen) 56
Figuur 23: pH-opbrengstresponscurves voor de 10 teelt(groep)en, per bodemtextuurklasse 57

Figuur 24: Gemiddelde N-opname i.f.v. de pH-beoordelingsklasse voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte 58
Figuur 25: Distributie nitraatresidu: alle cijfers (2011-2014) 62
Figuur 26: Distributie log-getransformeerd nitraatresidu (2011-2014) 63
Figuur 27: Gemiddelde nitraatresidu's i.f.v. pH-beoordelingsklasse voor weiland- (links) en akkerpercelen (rechts; 66
Figuur 28: Gemiddelde nitraatresidu's i.f.v. pH-beoordelingsklasse voor de categorieën (teeltgroep*bodemtextuurklasse*jaar) waarvoor een significant effect van pH-beoordelingsklasse op het nitraatresidu werd berekend; verticale lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval weer per jaar 69
Figuur 29: Voorspelde vs. gemeten nitraatresidu-waarden met optimale mixed models per teeltgroep, EVANIR-dataset 2012-2014 77
Figuur 30: Neerslag en gemiddelde temperatuur per maand in Nossegem en Melsbroek voor de jaren 2012, 2013 en 2014 in vergelijking met de gemiddelde waarden van de laatste 10 jaar (stippellijnen geven de standaardafwijking aan) (bron: Metagri en Waterinfo, VMM) 82
Figuur 31: Totale N-hoeveelheid in het bodemprofiel tijdens de winter per teeltgroep voor Vlaanderen, o.b.v. de nitraatresidu-gegevens van de VLM-databank 89
Figuur 32: Gemiddelde N-hoeveelheid in het bodemprofiel in de winter per teeltgroep, o.b.v. de nitraatresidu-gegevens van de VLM-databank 90
Figuur 33: Berekening van de nitraatconcentratie (links) en de overeenkomstige N-hoeveelheid (rechts) onderaan de wortelzone (-90 cm diepte), in functie van het neerslagoverschot met behulp van een analytisch uitspoelingsmodel, op basis van een N-hoeveelheid van 90 kg N/ha in het bodemprofiel (0-90cm) tijdens de winter en een grondwatertafel op -200 cm beneden maaiveld (Van Overtveld et al., 2011) 93
Figuur 34: Berekende hoeveelheid nitraat-N onderaan de wortelzone (uitspoelbaar) in % van de N-hoeveelheid in het bodemprofiel (0-90 cm) tijdens de winter 94
Figuur 35: Neerslagoverschot in de winter (1 november tot 31 maart) volgend op de meting van de nitraatresidu's van 2011 tot en met 2018; de rode kader geeft de gegevens van 2012 t/m 2014 aan (bron: Metagri Melsbroek en VMM waterinfo Nossegem) 94
Figuur 36: Gemiddelde opbrengstderving door sub-optimale pH per teeltgroep in de "huidige" pH-situatie 105
Figuur 37: Frequentieverdeling van de opbrengstverliezen door sub-optimale pH, per teeltgroep en per bodemtextuurklasse 107
Figuur 38: Gemiddelde vereiste herstelbekalkingsdosis per teeltgroep 109
Figuur 39: Frequentieverdeling van de vereiste herstelbekalkingen om de pH in de streefzone te brengen, per teeltgroep en per bodemtextuurklasse 111
Figuur 40: Gemiddelde N-hoeveelheid onderaan de wortelzone in de winter, per landbouwstreek en per teeltgroep (berekeningen o.b.v. nitraatresidu-gegevens van de VLM-dataset) 118

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Optimale zones voor de zuurtegraad volgens de Code van goede praktijk bodembescherming (2015) 15
Tabel 2: Limietwaarden voor de zuurtegraad volgens de Code van goede praktijk bodembescherming (2015) 16
Tabel 3: Beoordelingsklassen en streefzone voor de pH(KCl) in functie van de textuurklasse en het landgebruik (akkers of weilanden), bij een koolstofgehalte binnen de streefzone (Tits et al., 2016) 22
Tabel 4: Optimale pH en pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte (o.b.v. Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Bries & Moermans, 2015; Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973; Tumusiime et al., 2010) 26
Tabel 5: Invloed van bekalking op het nitraatresidu (kg N/ha) (bron: Bries & Moermans, 2015) 27
Tabel 6: Geschatte gemiddelde N-opname en opbrengsten van de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen (Tits et al., 2018; VLM, 2011; D'Haene et al., 2018; diverse bronnen, mededelingen Koen Cochez, 9/5/2019 en 23/5/2019) 30
Tabel 7: Kalksoorten 34
Tabel 8: Verzurende werking (uitgedrukt in basenequivalenten (BE) per 100 kg meststof) van minerale meststoffen (bronnen: BDB, Nutrinorm2) 36
Tabel 9: Optimale pH en vereenvoudigde pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse (o.b.v. Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Tabel 6, Bries & Moermans, 2015; Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973; Tumusiime et al., 2010; databank historische bekalkingsproeven BDB) 55
Tabel 10: Aantal stalen waarop zowel het nitraatresidu als de pH-KCl gemeten werd (bron EVANIR-databank BDB) 60
Tabel 11: Pearson Correlatiecoëfficiënten nitraatresidu*pH-KCl, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse; rechts: enkel percelen met pH-klasse <= 4; aantal stalen tussen haakjes; significante correlaties (p<0.05) zijn in het rood aangeduid (bron EVANIR-databank BDB) 61
Tabel 12: Variantieanalyse van het nitraatresidu i.f.v. de pH-klasse, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse; significante verbanden (p<0.1) zijn in het rood aangeduid 64
Tabel 13: Lineaire regressies van het log-getransformeerd nitraatresidu (Nres_t) i.f.v. pH-KCl voor weilanden en akkers, globaal en per bodemtextuurklasse enkel percelen met pJ-klasse <=4; significante regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid 70
Tabel 14: Lineaire regressies van het log-getransformeerd (Nres_t) en (voor akkerpercelen) het gestandaardiseerd getransformeerd nitraatresidu (Nres_t_z) i.f.v. pH-KCL, per jaar en per bodemtextuurklasse enkel percelen met pH-klasse <=4; significantie regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid 72
Tabel 15: Lineaire regressies van het log-getransformeerd nitraatresidu (Nres_t) i.f.v. pH-KCL, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. log-getransformeerde nitraatresidu's (Nres_t, links) en gestandaardiseerde log-getransformeerde nitraatresidu's (Nres_t_z, rechts), waarbij de laatsten per teeltgroep teruggerekend werden enkel percelen met pH-klasse <=4; significante regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid 73
Tabel 16: General linear mixed model analyse op log-getransformeerde nitraatresidu's: weerhouden modellen per teeltgroep, p-waarden per weerhouden parameter en R^2 van het model (GS_klas = bodemtextuurklasse) 75
Tabel 17: Aantal en areaal van de nitraatresidumetingen waarbij ook pH en %C werden bepaald (EVANIR-dataset), per teeltgroep en per bodemtextuurklasse en voor gans Vlaanderen (2012-2014) 79
Tabel 18: Oppervlakte-aandeel (%) van de bodemtextuurklassen per teeltgroep op basis van de landbouwstreken (volgens percelendataset VLM 2014), in vergelijking met de oppervlakte-aandelen op basis van de EVANIR-dataset 81
Tabel 19: Gemiddelde nitraatresidu's per teeltgroep en bodemtextuurklasse o.b.v. de EVANIR-dataset (2012-2014), resultaten geëxtrapoleerd naar Vlaanderen 84
Tabel 20: Gemiddelde nitraatresidu's per teeltgroep en bodemtextuurklasse o.b.v. de VLM-dataset 2012-2014), resultaten geëxtrapoleerd naar Vlaanderen 84
Tabel 21: Gemiddelde gewasopname van stikstof tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse 86
Tabel 22: Gemiddelde stikstofmineralisatie tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse 88
Tabel 23: Gemiddelde stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) op perceelsniveau tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19) 91
Tabel 24: Gemiddelde stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) op perceelsniveau tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20) 91

Tabel 25: Totale stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19) 92
Tabel 26: Totale stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20) 92
Tabel 25: Gemiddelde stikstofhoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19) 96
Tabel 26: Gemiddelde stikstofhoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20) 96
Tabel 27: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset 99
Tabel 28: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het totaal nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset 99
Tabel 29: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-nitraatresidu-dataset 100
Tabel 30: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het totaal nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-nitraatresidu-dataset 100
Tabel 31: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset 102
Tabel 32: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-dataset 102
Tabel 33: Gemiddelde "normale" opbrengsten per teeltgroep (bron: Tits et al., 2018) 105
Tabel 34: Gemiddelde opbrengst bij huidige en bij optimale pH en gemiddelde en maximale jaarlijkse opbrengstderving door sub-optimale pH per teeltgroep en per bodemtextuurklasse 106
Tabel 35: Gemiddelde, maximale en totale vereiste bekalking om de pH in de streefzone te brengen per teeltgroep en per bodemtextuurklasse, uitgedrukt in zbw en in € (kostprijs) 110
Tabel 36: Tijdelijk effect van bekalking op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter die volgt op de bekalking, per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. de EVANIR-dataset 113
Tabel 37: Tijdelijk effect van bekalking op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter die volgt op de bekalking, per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. de VLM-dataset 113
Tabel 38: Beoordelingsklassen en streefzone voor de pH(KCl) in functie van de textuurklasse en het landgebruik (akkers of weilanden), bij een koolstofgehalte binnen de streefzone (Tits et al., 2016) 124
Tabel 39: Optimale pH-streefzone in functie van bodemgebruik (bron: Braekman et al., 2014) 124

1 SAMENVATTING

In deze desk-studie werd de invloed van pH en bekalking op de efficiëntie van de N-bemesting, het nitraat-N residu en de N-uitspoeling naar het grondwater onderzocht, op basis van literatuurstudie en door analyse van historisch onderzoek en andere beschikbare databanken, zoals de N-residu-databank (EVANIR), de databank van de standaardgrondontledingen (BEMEX) en de N-ontledingen (N-INDEX) van de BDB. Het doel van het onderzoek was om na te gaan in welke mate het optimaliseren van de bodem-pH van landbouwpercelen door bekalking een positieve invloed zou kunnen hebben op de waterkwaliteit. De effecten van de bodem-pH op N-efficiëntie, N-residu en N-uitspoeling werden begroot om bijkomend inzicht te leveren.

Een eerste stap in het onderzoek is het bepalen van de optimale pH van landbouwbodems in Vlaanderen. Deze is afhankelijk van een aantal factoren, voornamelijk grondsoort en humusgehalte, maar verschilt ook tussen teelten. Uit de nationale en internationale literatuur en (historische) proefvelddata kan besloten worden dat de pH-beoordelingsklassen en streefzones die toegepast worden door de BDB (o.a. Tits et al., 2016) een betrouwbaar en relevant referentiekader vormen voor de Vlaamse bodem-, teelt- en weersomstandigheden.

Vervolgens werd de invloed van pH en bekalking op de verschillende N-processen in de bodem in kaart gebracht. Vooral de effecten op de N-mineralisatie en de gewasopname van N bleken belangrijk te zijn in het kader van deze studie, terwijl processen zoals vervluchtiging, denitrificatie en N-fixatie konden verwaarloosd worden. In het kader van de klimaatopwarming dient wel opgemerkt te worden dat het bij denitrificatie onder andere van de pH afhangt of als eindproduct atmosferisch stikstof (N_2) of lachgas (N_2O) ontstaat; bij lagere pH wordt meer lachgas gevormd, wat een sterk broeikasgas is.

Zowel uit de literatuurstudie als uit praktijkervaring bleek het effect van de bodem-pH zelf op de N-mineralisatie onvoorspelbaar of eerder verwaarloosbaar te zijn, maar werd ook aangetoond dat een bekalking op korte termijn wel degelijk een tijdelijke verhoging van de N-mineralisatie in de bodem kan teweegbrengen. Hierdoor kan, zeker als deze bekalking in het najaar gebeurt zonder dat er op korte termijn een gewas ingezaaid wordt, een stijging van het nitraatresidu verwacht worden.

Anderzijds wordt de gewasopname wel duidelijk beïnvloed door de pH. Een niet-optimale pH zorgt voor een lagere gewasopname van N en dus ook voor een hoger nitraatresidu, indien de bemesting dezelfde blijft. Ook de andere voedingselementen zijn dan minder beschikbaar. Eveneens op basis van een literatuurstudie aangevuld met historische Belgische proefvelddata werden gewas-pH-responscurves opgesteld voor de belangrijkste teeltgroepen (weiland, maïs, tarwe, gerst, aardappelen, suikerbieten, wortelen, erwten, bloemkool en prei) en in functie van de bodemtextuurklasse (zand, zandleem, leem, klei). Deze responscurves lieten toe om de invloed van de pH op de gewasopname en op de gewasopbrengst te berekenen.

De huidige situatie van de pH werd in kaart gebracht, op basis van de BEMEX-databank van de BDB. In de periode 2015-2018 hadden 51% van de akkers en 30% van de weilanden een pH lager dan de streefzone. Akkerpercelen met een te lage pH komen vooral in het zuidwestelijk deel van Vlaanderen voor. Voor weilandpercelen liggen de streefzones voor de pH lager dan voor akkers. Ze hebben gemiddeld een hoger percentage percelen binnen de streefzone of zelfs hoger (overbekalking!).

Ook de huidige situatie van de nitraatresidu's werd, pro memo (zie ook Mestbankrapporten), in kaart gebracht.

Statistische verbanden tussen bodem-pH en nitraatresidu werden berekend uit (een deel van) de EVANIR-databank waar, naast de N-residumetingen, ook pH-, textuur- en organische-C-gegevens beschikbaar waren. Voor weilanden was de pH in veel percelen in orde en kon uit de statistische analyse geen eenduidig effect of

zelfs een verhoging van het N-residu bij stijgende pH afgeleid worden. Voor akkers met een sub-optimale pH werd, hoewel de resultaten zeer wisselend waren tussen teeltgroepen en bodemtextuurklassen, een overwegend “positief” effect vastgesteld, m.a.w. N-residu’s dalen bij stijgende pH.

In de tweede fase van de studie werd de N-uitspoeling tijdens de winter doorgerekend op schaal Vlaanderen voor de “huidige” pH-situatie en voor een “optimale-pH”-situatie. De N-uitspoeling tijdens de winter werd berekend voor de percelen opgenomen in de EVANIR-databank in 2012, 2013 en 2014. Deze jaren komen overeen met eerder “normale” jaren m.b.t. weersomstandigheden en gewasontwikkeling.

Voor de berekening werd eerst de N-hoeveelheid in het bodemprofiel (0-90 cm) tijdens de winter berekend o.b.v. het N-residu in het najaar en de N-mineralisatie en -gewasopname tijdens de winter. Daarna werden de resultaten van het analytisch uitspoelingsmodel van de procesfactorstudie (Van Overtveld et al., 2011) gebruikt om te schatten hoeveel van deze N tijdens de winter migreert tot onderaan de wortelzone (en dus kan uitspoelen naar het grondwater).

Op deze manier werd voor Vlaanderen in de “huidige” situatie berekend dat, tijdens de winter en bij de belangrijkste teeltgroepen (96% van het areaal cultuurgrond), in totaal 34 tot 38 miljoen kg N onderaan de wortelzone terechtkomt en kan uitspoelen naar het grondwater. Ter vergelijking werd met het NEMO-model voor 2014 een totale N-percolatie uit de onverzadigde zone berekend van 49 miljoen kg N. Dit betreft weliswaar de totale N-percolatie voor het ganse jaar, terwijl in de huidige studie enkel de doorspoeling tijdens de winter (november-maart) berekend wordt.

Voor de berekening in de “optimale” situatie werd voor elk perceel de optimale pH bepaald rekening houdend met de bodemtextuur en het organische-C-gehalte, waarna een theoretisch N-residu werd berekend volgens 2 benaderingen. In de eerste benadering werden de N-residu's bij optimale pH berekend volgens een lineaire regressie afgeleid uit de statistische analyse. In de tweede, optimistische benadering werden de pH-gewasresponscurves gebruikt, waarbij voor percelen met een huidige sub-optimale pH een verhoging van de N-opname berekend werd bij optimale pH. Deze verhoogde opname werd volledig in mindering gebracht van het N-residu. In beide benaderingen werd de overeenkomstige theoretische N-uitspoeling berekend zoals voor de “huidige” situatie. In de eerste benadering daalde het N-residu bij optimale pH met 2,5%; de overeenkomstige N-uitspoeling daalde met 1,5%. In de tweede, optimistische benadering daalde het N-residu met 20% en de overeenkomstige N-uitspoeling met 14%.

In de kosten-baten-analyse voor de landbouwers werd de huidige jaarlijkse opbrengstderving omwille van sub-optimale pH geschat o.b.v. de eerder opgestelde gewasresponscurves. De totale jaarlijkse opbrengstderving voor heel Vlaanderen werd berekend op 107 miljoen €, hetzij gemiddeld 167 €/ha. De grootste totale opbrengstdervingen werden berekend voor maïs en groenten. Voor weiland waren de opbrengstdervingen zoals verwacht het laagst.

De nodige herstelbekalking om de pH te optimaliseren evenals de kostprijs ervan werden berekend per perceel en geëxtrapoleerd naar Vlaanderen. Op basis van kleinschalige bevragingen bij landbouwers en verdelers en in samenspraak met de opdrachtgever werd een gemiddelde prijs voor product+toediening van 60 €/ton kalk (aan gemiddeld 50% zbw) vastgesteld. Met deze cijfers werd berekend dat, om alle percelen in Vlaanderen binnen de pH-streefzone te brengen, een (éénmalige) bekalkingshoeveelheid van in totaal 605 miljoen zbw nodig zou zijn, wat overeenkomt met een (éénmalige) investering van 73 miljoen €. Dit komt neer op een gemiddelde van 944 zbw/ha hetzij 113 €/ha. Hierbij dient vermeld te worden dat de vereiste bekalkingshoeveelheden berekend werden op basis van een bouwvoordiepte van 23 cm (6 cm voor weilanden). Als er dieper geploegd wordt, moet een groter bodemvolume in de pH-streefzone gebracht of gehouden worden. Hiervoor is een hogere hoeveelheid kalk nodig en zal ook de vereiste éénmalige investering hoger liggen.

Tenslotte moet, in de winter die volgt op het toedienen van de bekalking, rekening gehouden worden met een tijdelijke toename van de N-mineralisatie. Deze extra mineralisatie werd, op basis van literatuur, geschat op gemiddeld 15% en moet, op percelen zonder gewasbedekking in de winter, meegeteld worden voor mogelijke uitspoeling. Uit de doorrekening hiervan bleek dat het uitvoeren van een éénmalige herstelbekalking de totale N-uitspoeling in Vlaanderen gedurende de winter volgend op de bekalking éénmalig zou verhogen met 2,8% tot 3,2%. Daartegenover staat een vermindering van de N-uitspoeling in de daaropvolgende jaren met 1,5 tot 15%, dank zij de optimalisatie van de pH.

Naar praktische implementatie m.b.t. bekalking werden een aantal algemene regels en aandachtspunten m.b.t. het opstellen en toepassen van bekalkingsadviezen aangehaald.

Op basis van een bouwvooranalyse wordt een bekalkingsadvies opgesteld voor de eerstvolgende 3 teelten. Dat advies houdt rekening met diverse factoren zoals gewaseigenschappen en –behoeften (bv. geen bekalking voor aardappelen), bodemeigenschappen en ook recente bekalkingen.

Wanneer een herstelbekalking vereist is, wijst dit reeds op opbrengstverlies zodat het zowel economisch als ecologisch verantwoord is om te bekalken, omdat dit er voor zal zorgen dat de N-opname geoptimaliseerd wordt.

Het is daarbij belangrijk om zo snel mogelijk te bekalken, d.w.z. onmiddellijk na de vorige teelt (bv. op de graanstoppel), en de kalk goed in te werken om een maximaal effect te hebben voor de volgende teelt.

Bedenk wel dat bekalken een tijdelijk effect heeft op de mineralisatie. Om deze reden is het ten zeerste aan te bevelen om na bekalking een winterteelt of groenbedekker te zaaien om de extra vrijgekomen N vast te leggen.

Bij de keuze van de kalksoort moet ook rekening gehouden worden met de werkingstermijn (fijnere kalksoort voor snellere werking, en de eventuele correctie van het Mg- of Ca-gehalte van de bodem.

Tenslotte moet men ook oppassen voor het mengen met andere meststoffen: kalk mag niet gemengd worden met organische mest of met fosfaat-, sulfaat- of ammoniumhoudende meststoffen.

-

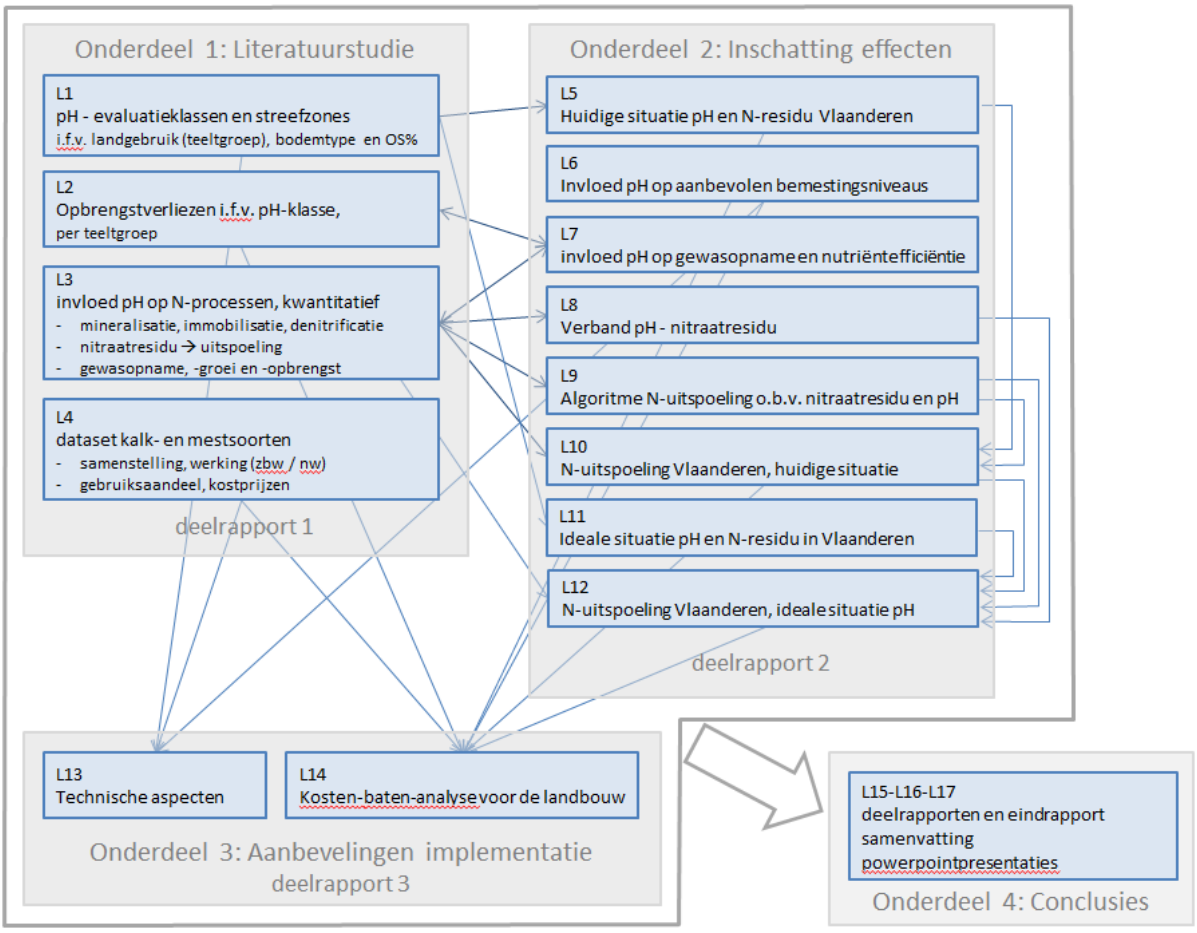
2 INLEIDING

Dit document geeft invulling aan de opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij (VLM), volgens de gunning van 4/3/2019 voor het onderzoek “Invloed van pH en bekalking op stikstofbemesting, - nitraatresidu en -uitspoeling” gekend onder bestek nr. APLM/2018/5.

Het onderzoek dat in dit verslag wordt voorgesteld betreft de invloed van pH (en bekalking) op de efficiëntie van de stikstofbemesting, het nitraat-N residu en het uitspoelen van nutriënten. Het doel van het onderzoek is na te gaan, op basis van wetenschappelijke literatuur, in welke mate het optimaliseren van de bodem-pH van landbouwpercelen door bekalking een positieve invloed kan hebben op de waterkwaliteit. Er wordt hiervoor vooral gekeken naar het effect op de nitraatverliezen door een efficiëntere stikstofbenutting, maar ook indirecte effecten kunnen bekeken worden. De begroting van het effect op stikstofefficiëntie, nitraatresidu en stikstofuitspoeling kan bijkomend inzicht leveren in de problematiek van de gestagneerde waterkwaliteit.

3 AANPAK

Het project omvat 4 onderdelen. De eerste 3 onderdelen, die elk uitmonden in een aantal leverbaarheden, omvatten de nodige stappen om uiteindelijk te komen tot het 4de onderdeel, met de conclusies van het onderzoek. De onderlinge samenhang tussen de onderdelen en leverbaarheden wordt weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Onderdelen en leverbaarheden

4 ONDERDEEL 1: LITERATUURSTUDIE

In het eerste onderdeel werd een literatuurstudie uitgevoerd waarbij een overzicht werd gegeven van de verschillende classificaties en streefzones die voor pH in landbouwbodems worden gehanteerd. Daarnaast werden ook gegevens verzameld over de invloed van de bodem-pH op de stikstofefficiëntie, de stikstofuitspoeling en het nitraatresidu en over de manier waarop bekalking en bemesting ingrijpen op deze processen.

4.1 OVERZICHT CLASSIFICATIES EN STREEFZONES IN FUNCTIE VAN GRONDSOORT EN TEELT

4.1.1 Achtergrond

De pH is een belangrijke graadmeter voor de vruchtbaarheid van de bodem. De pH beïnvloedt de vorm waarin nutriënten in de bodem aanwezig zijn en daarmee de beschikbaarheid ervan. De pH heeft niet alleen een belangrijk effect op de chemische vorm van de verbindingen en hun omzettingen, maar ook op biologische processen, zoals mineralisatie en opname door de planten. Een gunstige pH zal niet alleen de mineralisatie bevorderen maar ook de plant in staat stellen normaal te groeien en de geproduceerde stikstof en andere voedingselementen op te nemen. Deze biologische processen hebben een optimum pH-zone, die vaak ligt tussen 6 en 7. Bij te lage of te hoge pH vermindert de opname van nutriënten door plantenwortels. Dit komt enerzijds door het directe negatieve effect van H^+ ionen op de wortelgroei en opname van nutriënten, en anderzijds doordat bij een lage pH de beschikbaarheid van veel nutriënten laag is. Daardoor heeft een ongunstige pH ook een invloed op de gewasopbrengst wat zich vertaalt in een opbrengstverlies.

De optimale pH in de bodem is afhankelijk van een aantal factoren, voornamelijk de grondsoort, het humusgehalte, maar de optimale pH kan ook verschillen tussen teelten.

Om de optimale pH te bepalen is het belangrijk om eerst te bepalen op welke manier deze pH gemeten wordt. Er bestaat nl. een belangrijk verschil naargelang de pH gemeten wordt in een waterextract (pH-water) of in een zoutoplossing zoals pH-KCl of pH-$CaCl_2$.

4.1.2 Geraadpleegde bronnen

Voor het overzicht van pH meting, beoordeling en streefzones in verschillende landen werden de volgende bronnen geraadpleegd:

Vlaanderen:

- Bodemkundige Dienst van België, o.a. Tits et al., 2016; Vandendriessche et al., 2016
- Code van goede praktijk bodembescherming, CVGP, 2015
- Praktijkgids Bemesting - meststoffen en groenbedekkers, Braekman et al., 2014

(Noordelijk) Frankrijk:

- Agro Conseil (www.agro-conseil.fr), Bodemkundige Dienst van België, Tits et al., 2016.

Wallonië:

- Brochure sols Requasud, Genot et al., 2012 (http://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_sols_2012.pdf)

Nederland:

- Commissie Bemesting Akkerbouw/Vollegrondsgroententeelt (CBAV), Handboek Bodem en Bemesting (www.handboekbodemenbemesting.nl)
- Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, versie 2019 (https://edepot.wur.nl/413891)

Duitsland:

- Kerschberger M., Deller B., Hege U., Heyn J., Kape H.-E., Krause O., Pollehn J., Rex M.J., Severin K. (2000) Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Ed. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/0-9-kalk.pdf).

Verenigd Koninkrijk:

- DEFRA, 2010. Fertiliser Manual (RB209), DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs), London. http://adlib.everysite.co.uk/adlib/defra/content.aspx?id=2RRVTHNXTS.88UEXK17ISSM6; https://ahdb.org.uk/knowledge-library/rb209-section-1-principles-of-nutrient-management-and-fertiliser-use

Denemarken:

- LandbrugsInfo SEGES (2019) Kalkningsvejledning https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/goedskning/kalkning/sider/startside.aspx

USA, North Carolina:

- NC State Extension Publications, Soil Acidity and Liming for Agricultural Soils (https://content.ces.ncsu.edu/soil-acidity-and-liming-for-agricultural-soils)

4.1.3 Wettelijk kader

Voor Vlaanderen heeft het wettelijk kader voor de bodem-pH enerzijds betrekking op erosiebestrijding en anderzijds op organische stof (zie brochure "GLB Randvoorwaarden 2019" (https://lv.vlaanderen.be/sites/default/files/attachments/rvw_19_002_versie_20190101.pdf) en Code van goede praktijk bodembescherming (https://esites.vito.be/sites/reflabos/2015/Online%20documenten/CVGP_versie_februari_2015.pdf).

M.b.t. erosiebestrijding worden de optimale zones voor de zuurtegraad van de bodem opgegeven waarbinnen een perceel - in combinatie met een organische-koolstofgehalte van 1,7% of meer - in aanmerking komt voor een verlaging van de erosiegevoeligheidsklasse (Tabel 1).

Tabel 1: Optimale zones voor de zuurtegraad volgens de Code van goede praktijk bodembescherming (2015)

type bodem	Optimale zone zuurtegraad (pH-KCl)
zand	5,0 - 6,0
zandleem	5,5 - 6,5
leem	6,5 - 7,5
klei	7,0 - 8,0

M.b.t. de handhaving organische stof moeten landbouwers de zuurtegraad en het organische-C-gehalte van een aantal percelen laten bepalen. Bij een te laag koolstofgehalte moeten ze het advies dat gegeven wordt op basis

van de analyseresultaten (bv. bekalking) volgen. Beneden deze zones moet de landbouwer actie ondernemen om de landbouwgrond in goede landbouw- en milieuconditie te brengen.

Tabel 2: Limietwaarden voor de zuurtegraad volgens de Code van goede praktijk bodembescherming (2015)

type bodem	limietwaarde zuurtegraad (pH-KCl)
zand	≤ 4,5
zandleem	≤ 5,5
leem	≤ 6,0
klei	≤ 6,5

Binnen Europa is Vlaanderen de enige regio die randvoorwaarden m.b.t. bodem-pH geïmplementeerd heeft in een wettelijk kader (European Commission, 2007).

4.1.4 Staalname

Voor een representatieve bodemstaalname voor de bepaling van de algemene bodemvruchtbaarheid en in het bijzonder de pH van een landbouwperceel moeten een aantal regels in acht genomen worden, zoals:

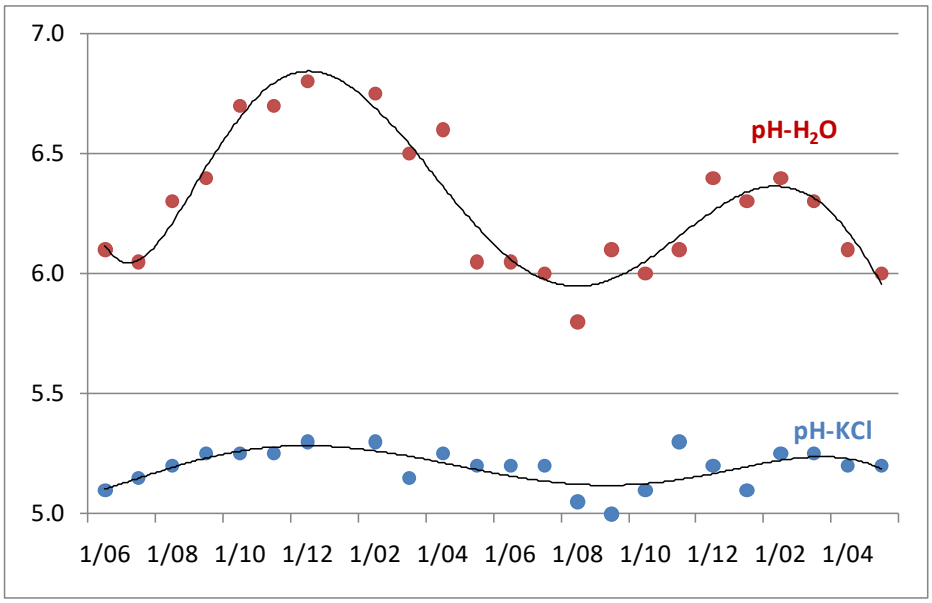
- Het tijdstip van de staalname: dit kan in principe het hele jaar door. Na een recente bemesting of bekalking wordt best minstens een maand gewacht vooraleer een bodemstaal te nemen, om contaminatie van het staal te vermijden. Het beste staalnametijdstip is echter het najaar omdat, als uit de bodemanalyse blijkt dat bekalking nodig is, deze nog voor de winter kan toegediend worden. De ontzurende werking van de kalk kan dan ten volle inwerken op de bodem zodat deze zich tegen de volgende lente in goede pH-conditie bevindt.
- Plaats en oppervlakte van de staalname: Het te bemonsteren perceel moet homogeen zijn voor wat betreft bodemfysische en bodemchemische eigenschappen. Als het perceel groter is dan 2 hectare wordt het in twee of meerdere homogene deelpercelen opgesplitst die apart bemonsterd worden.
- Diepte: In akkers worden bouwvoorstalen genomen, d.w.z. tot een diepte van 23 cm in Vlaanderen, 25 cm in Nederland, 25-30 cm in Duitsland, 25 cm in Denemarken of 15 cm in het Verenigd Koninkrijk. In weilanden worden ondiepere stalen genomen, tot 6 cm (Vlaanderen), 10 cm (Nederland, Duitsland) of 7,5 cm (Verenigd Koninkrijk) diepte.
- Deelstalen: Voor de bemonstering van een (deel)perceel akkerbouw of vollegrondsgroenten wordt in Vlaanderen op minstens 25 plaatsen een deelstaal genomen. Voor weiland worden minstens 35 deelstalen genomen. In Nederland bedraagt het aantal steken 40 per staalname (Handboek Bodem en Bemesting).

4.1.5 Meting

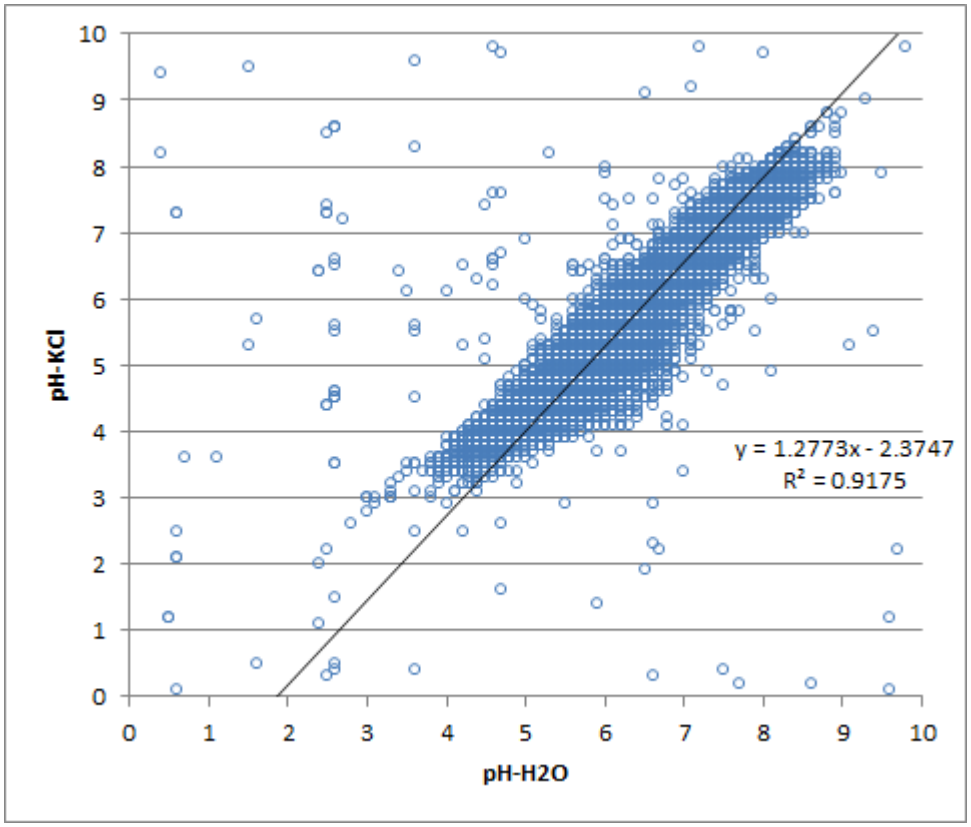
In het onderzoek naar de kalkbehoefte van de landbouwgronden werkte de Bodemkundige Dienst van België in de beginjaren nagenoeg uitsluitend met de pH-H_2O (actuele zuurheid). De pH-H_2O is echter afhankelijk van het zoutgehalte van de bodem. Aangezien het zoutgehalte van de bodem fluctueert tijdens het jaar, schommelt ook de pH-H_2O in functie van het tijdstip van de meting (Figuur 2). De pH-KCl daarentegen wordt niet beïnvloed door het zoutgehalte en is dan ook stabieler gedurende het ganse jaar. Hierdoor vormt de pH-KCl een betere basis voor het beoordelen van de zuurtegraad en het berekenen van bekalkingsadviezen. Het verschil tussen beide methoden kan echter variëren van 0,3 tot 1,5 (gemiddeld 0,7, zie ook Figuur 3).

De Bodemkundige Dienst is dan ook al snel, vanaf 1951, overgestapt naar de bepaling van de pH-KCl (potentiële zuurheid) als basis voor het bekalkingsadvies. Toch werden beide pH-bepalingen nog tot 1989 gezamenlijk uitgevoerd. Daarna werd enkel nog de pH-KCl-bepaald (Vandendriessche et al., 2016).

Om de zuurtegraad van de bodem nauwkeurig te bepalen is een reactie van de bodem met de kaliumchlorideoplossing nodig gedurende twaalf uur. De reactietijd is van groot belang omdat de waterstofionen een dynamisch evenwicht moeten bereikt hebben alvorens de pH correct kan gemeten worden. Tegenwoordig worden deze metingen door de Bodemkundige Dienst van België volledig geautomatiseerd uitgevoerd in de pH-robot.



Figuur 2: Seizoenschommeling van pH-water en pH-KCl van de bodem (bron: archieven BDB)



Figuur 3: Verband tussen pH-H2O en pH-KCl op basis van 354014 metingen in de periode 1975-1988 (bron: archieven BDB)

In Wallonië wordt de pH eveneens gemeten in KCl-extract (Genot et al., 2012).

In Nederland wordt de zuurtegraad in akkers en vollegrondsgroenten gemeten in $CaCl_2$. Voor de omrekening van pH-$CaCl_2$ naar pH-KCl wordt door het Handboek Bodem en Bemesting (Nederland) de volgende formule gebruikt:

$$pH\text{-}CaCl_2 = 0{,}9288 * pH\text{-}KCl + 0{,}5262$$

Voor grasland wordt de pH uitgedrukt in pH-KCl (Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, 2019).

Ook in Duitsland en Denemarken wordt de zuurtegraad gemeten in $CaCl_2$.

In het Verenigd Koninkrijk wordt de pH vaak gemeten in waterextract (pH-H_2O).

4.1.6 Optimale pH en streefzones op basis van grootschalig bekalkingsonderzoek

(Naar Vandendriessche et al., 2016)

In 1947 startte de Bodemkundige Dienst van België haar eerste grootschalige onderzoeksproject op, met name een systematische studie van de invloed van de pH van de bodem op het rendement van de landbouwteelten (Stenuit & Piot, 1954). Vervolgens werden talrijke meerjarige bekalkingsproefvelden aangelegd op de verschillende bodemtypes in België. Tussen 1948 en 1972 legde de Bodemkundige Dienst 365 wetenschappelijke bekalkingsproefvelden aan met verschillende soorten en dosissen kalk op landbouwgronden. Tussen 1947 en 1951 werden door de BDB samen met de BJB (Boerenjeugdbond) 137 demonstratievelden omtrent bekalking

aangelegd. In 1956 werden potproeven opgezet voor bekalkingsonderzoek. Vanaf 1962 werden meerjarige bekalkingsproefvelden aangelegd in bossen o.a. in Meerdaalbos op de Den van Koekelare en te Vielsalm op Douglas en Epicea. Vanaf 1947 werd uitgebreid statistisch onderzoek gevoerd omtrent de correlatie tussen pH van de bodem en de opbrengsten in samenwerking met meer dan 70 staalnemers verspreid over het ganse land.

De eerste resultaten van dit onderzoek werden gepubliceerd in 1950 (BDB, 1950) en via grootschalige informatiecampagnes en demonstratieproeven werden de landbouwers aangemoedigd om de zuurtegraad van hun gronden, op basis van grondontledingen en bekalkingsadviezen, in orde te brengen.

Het is tot op heden een goede gewoonte gebleven om de resultaten van de praktijkpercelen te bundelen in statistieken en daaruit bijkomende expertise te halen die wordt gedeeld met de land- en tuinbouwers, de onderzoekswereld en de voorlichters. De pH-statistiek van de praktijkvelden in België wordt weergegeven in historische tijdreeksen gegroepeerd volgens de beoordelingsklassen te laag (te zuur), streefzone, te hoog (te alkalisch).

De optimale pH is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de bodemtextuur, het organische-stofgehalte, het landgebruik (akker of weiland), maar ook van de teelt zelf. Het jarenlange proefveld- en laboratoriumonderzoek op de Bodemkundige Dienst van België heeft geleid tot het opstellen van:

- evaluatiegrenzen voor de pH in functie van de grondsoort, het humusgehalte en het bodemgebruik;
- een adequate berekeningsmethode van de kalkbehoefte voor iedere mogelijke combinatie van perceelsgebruik-grondsoort-humusgehalte-pH van de bodem;
- een groot aantal kennisregels met betrekking tot de optimale verdeling van de totale kalkdosis over de teeltrotatie, het optimale bekalkingstijdstip en aanwijzingen omtrent aanverwante problemen (gebreksverschijnselen, zuurwerkende meststoffen, …).

4.1.6.1 Optimale pH in functie van bodemtextuur en organische-stofgehalte

Zandgronden zijn in het algemeen zuurder dan andere gronden. In het algemeen geldt dat de optimale pH stijgt bij een stijgend kleigehalte van de bodem en bij een dalend organische-stofgehalte.

In Vlaanderen en in Noordelijk Frankrijk wordt bij de beoordeling van de pH en de bekalkingsadvisering een onderscheid gemaakt tussen de 4 grote textuurklassen zand, zandleem, leem en klei. De streefzones worden voorgesteld uitgaande van een optimaal organische-stofgehalte (Tits et al., 2016).

In Wallonië wordt bij de pH-beoordeling en bekalkingsadvisering geen verder onderscheid gemaakt tussen de grondsoorten (Genot et al., 2012, Bijlage 9.2).

In Nederland zijn de pH-streefzones in het Handboek Bodem en Bemesting zeer gedetailleerd opgesteld in functie van de grondsoort en het organische-stofgehalte. De grondsoorten worden hierbij opgedeeld in dekzand-, dal- en veengronden enerzijds en zeeklei, zeezand, rivierklei en löss anderzijds. Deze laatste klasse wordt verder opgesplitst in functie van het kleigehalte (Bijlage 9.3).

In Duitsland worden de streefzones eveneens opgesteld in functie van de grondsoort en het organische-stofgehalte. Bij de grondsoorten wordt onderscheid gemaakt tussen Sand (<=5% klei), schwach lehmiger Sand (5-12% klei), stark lehmiger Sand (12-17% klei), sandiger/schluffiger Lehm (17-25% klei), toniger Lehm bis Ton (>25% klei) en Moor (>30% organische stof) (Bijlage 9.4).

In het Verenigd Koninkrijk wordt enkel een onderscheid gemaakt tussen "Mineral soils" en "Peaty soils" (Bijlage 9.5).

In Denemarken wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende grondsoorten: 1-4 (kleigehalte <=10%), 5-6 (kleigehalte 10-15%), 7-9 (kleigehalte >= 15%) en 11 (veengronden, humusgehalte >10%) (Bijlage 9.6).

In North Carolina (US) worden de bodems opgedeeld in 3 klasses: minerale, mineraal-organische en organische bodems. Deze opsplitsing is gebaseerd op twee criteria, nl. het organische-stofgehalte en de bulkdensiteit (Bijlage 9.7).

4.1.6.2 Optimale pH in functie van landgebruik (akker of weiland)

Zowel bij de meting als bij de beoordeling van de pH en de bekalkingsadvisering wordt in de meeste landen een duidelijk onderscheid gemaakt tussen akkers en vollegrondsteelten enerzijds en meerjarig (permanent) grasland anderzijds. De optimale pH voor weiland ligt duidelijk lager dan voor akkers. Dit hangt samen met het feit dat de staalnamediepte voor weiland meestal lager is (6 cm in Vlaanderen) dan voor akkerland (23 cm in Vlaanderen).

4.1.6.3 Optimale pH in functie van teelt(groep)en

Optimale pH en daaraan gekoppelde bekalkingsadviezen worden aangepast aan specifieke teelteigenschappen. Aardappelen gedijen beter op gronden met een pH die iets lager ligt dan de streefzone. Ook graangewassen als haver, rogge, triticale groeien best op bodems met een iets lagere pH. Andere gewassen met een voorkeur voor een iets lagere pH zijn maïs, rapen, aardbeien, frambozen en braambessen. Suikerbieten, tarwe, gerst, raaigras, luzerne, klaver en groenten zoals prei, selder, bloemkool, bladgroenten, erwten, bonen en spinazie groeien dan weer beter bij een iets hogere pH (Anon., 1950; Braekman et al., 2014; DEFRA, 2010; Holland et al., 2018).

De pH van de bodem bepaalt ook welke voedingselementen beschikbaar zijn in de bodem en in welke mate ze kunnen worden opgenomen door de gewassen (Figuur 4). Een niet-optimale bodem-pH zal dus tot een minder efficiënte benutting van de toegediende voedingsstoffen (bemesting) leiden. Bij een te lage pH daalt de beschikbaarheid en opname van stikstof, fosfor, kalium, magnesium en zwavel. Dit is beperkend voor de plantengroei en in het bijzonder voor de groei van de wortels en de jeugdgroei van de plant. Een aantal spoorelementen is daarentegen zeer oplosbaar in zure bodem, in zoverre zelfs dat ze in schadelijke hoeveelheden voor de planten beschikbaar worden. De oorzaak dat gerst en bieten slecht groeien op een zure grond is een gevolg van hun gevoeligheid voor mangaanvergiftiging.

Figuur 4: Beschikbaarheid van de voedingselementen in functie van de pH (hier voor een zandgrond). Hoe breder de balk, hoe groter de beschikbaarheid bij de vermelde pH. (BAC, http//www.baconline.nl/downloads/folders/element_en.pdf).

Niet alleen de optimale pH voor de gewasgroei op zich en voor de nutriëntopname is belangrijk, maar ook de invloed van de pH op de gevoeligheid voor en de ontwikkeling van ziekten. Zo zijn aardappelen bij een hogere pH gevoeliger voor schurft. De gevoeligheid daalt significant bij een bodem-pH beneden 5,2. Daarom wordt algemeen meestal aanbevolen om niet te bekalken vóór een aardappelteelt. Ook Pythium (Pythium ultimum) en Fusarium (Fusarium oxysporum) ontwikkelen beter bij hogere pH-waarden (> 6 en 7 respectievelijk) (Holland et al., 2018). Ziekten zoals cavity spot bij wortelen (veroorzaakt door Pythium), knolvoet bij koolsoorten en koolzaad (Plasmodiophora brassicae) en Pseudomonas komen meer voor in zure gronden (Holland et al., 2018).

Vaak wordt bij de beoordeling van de pH dan ook een duidelijk onderscheid gemaakt tussen teelt(groep)en en/of rotatie-types. Zo wordt in Nederland, naast de grondsoort, het kleigehalte en het organische-stofgehalte ook rekening gehouden met het percentage aardappelen en bieten in de teeltrotatie. In Denemarken wordt een onderscheid gemaakt tussen "tolerante" gewassen (aardappelen, rogge, haver, gras), "gemiddeld gevoelige" gewassen (wintertarwe, wintergerst, maïs, rode en witte klaver, koolzaad, erwten) en "gevoelige" gewassen (luzerne, suikerbiet, zomergerst).

Bij de bekalkingsadvisering is het dan ook uitermate belangrijk om rekening te houden met de verschillende teelten in de vruchtwisseling, zodat niet alleen gestreefd wordt naar een globale optimale pH voor de ganse rotatie, maar de bekalking per teelt kan aangepast worden, o.a. met het oog op het voorkomen/bestrijden van (vooral grondgebonden) ziekten.

4.1.6.4 Algemene streefzones voor de pH doorheen de ganse vruchtwisseling

Tabel 3 geeft een overzicht van de beoordelingsklassen en streefzones voor de pH-KCl die toegepast worden door de Bodemkundige Dienst van België, zowel in Vlaanderen als in Noordelijk Frankrijk, met het oog op het behouden van een optimale bodemvruchtbaarheid en het behalen van optimale opbrengsten voor de meeste

teelten. De voorgestelde streefzones hebben dus betrekking op de globale optimale toestand van de bodem, doorheen de rotatie. Daarnaast is het natuurlijk zo dat voor bepaalde teelten de optimale pH iets lager (aardappelen) of iets hoger (suikerbieten) kan liggen. Bij het opstellen van de concrete bekalkingsadviezen wordt ingespeeld op deze specifieke teeltvereisten.

Akkers worden hierbij bemonsterd tot 23 cm diepte (bouwvoor) en grasland tot 6 cm diepte.

Bodems worden ingedeeld in bodemtxtuurklassen, nl. zand, zandleem, leem en klei. De klasse klei omvat alle klei- en poldergronden.

Zoals eerder toegelicht (zie 4.1.6) zijn deze streefzones gebaseerd op grootschalige bekalkingsproeven en -onderzoek dat uitgevoerd werd in Vlaamse omstandigheden in de jaren '50 tot '70.

Tabel 3: Beoordelingsklassen en streefzone voor de pH(KCl) in functie van de textuurklasse en het landgebruik (akkers of weilanden), bij een koolstofgehalte binnen de streefzone (Tits et al., 2016)

akkers

Beoordeling	pH(KCl) zand	pH(KCl) zandleem	pH(KCl) leem	pH(KCl) polders
sterk zuur	< 4,0	< 4,5	< 5,0	< 5,5
laag	4,0 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 6,4
tamelijk laag	4,6 - 5,1	5,6 - 6,1	6,1 - 6,6	6,5 - 7,1
streefzone	5,2 - 5,6	6,2 - 6,6	6,7 - 7,3	7,2 - 7,7
tamelijk hoog	5,7 - 6,2	6,7 - 6,9	7,4 - 7,7	7,8 - 7,9
hoog	6,3 - 6,8	7,0 - 7,4	7,8 - 8,0	8,0 - 8,1
zeer hoog	> 6,8	> 7,4	> 8,0	> 8,1

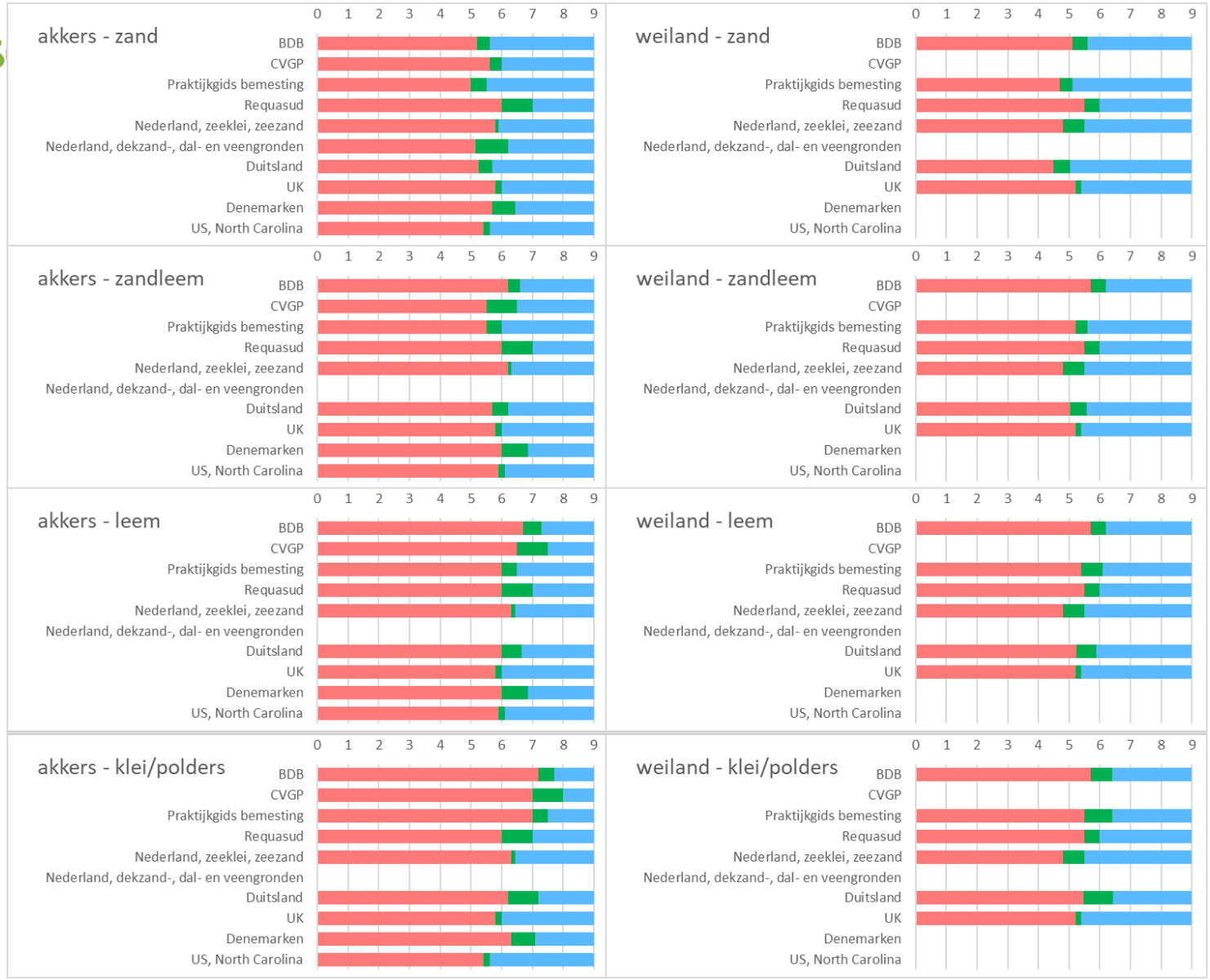
weilanden

Beoordeling	pH(KCl) zand	pH(KCl) zandleem - leem	pH(KCl) polders
sterk zuur	< 4,4	< 4,6	< 4,9
laag	4,4 - 4,7	4,6 - 5,1	4,9 - 5,3
tamelijk laag	4,8 - 5,0	5,2 - 5,6	5,4 - 5,6
streefzone	5,1 - 5,6	5,7 - 6,2	5,7 - 6,4
tamelijk hoog	5,7 - 5,9	6,3 - 6,5	6,5 - 6,8
hoog	6,0 - 6,4	6,6 - 7,0	6,9 - 7,2
zeer hoog	> 6,4	> 7,0	> 7,2

In Figuur 1 worden de in Vlaanderen gehanteerde streefzone's gesitueerd t.o.v. de streefzones die voorgesteld worden in andere landen of regio's in Europa en de US. Alle pH-waarden werden hierbij omgerekend naar pH-KCl, volgens de formules vermeld in 4.1.5. Om te komen tot een min of meer vergelijkbare indeling doorheen de verschillende landen/regio's, werden de toegepaste indelingen per land/regio zo veel mogelijk toegewezen aan de vier textuurklassen die gebruikt worden in Vlaanderen (zand, zandleem, leem en klei), op basis van hun kleigehalte en hun organische-stofgehalte (volgens de optimale organische-stofgehalten van de BDB, Tits et al., 2016). De organische-bodemklassen (peaty soils) werden buiten beschouwing gelaten. Als er, naast akkers-weiland, geen verdere indeling toegepast wordt (bv. Wallonië), werd de voorgestelde streefzone toegepast op alle 4 bodemtextuurklassen. Uit dit overzicht blijkt dat voorgestelde streefzones weliswaar hier en daar variëren tussen de verschillende landen/regio's, maar dat er toch enkele algemeen voorkomende trends kunnen vastgesteld worden: hogere pH-streefzones in akkers t.o.v. weilanden en hogere streefzones naarmate de bodemtextuur zwaarder wordt. Daarnaast moet ook benadrukt worden dat de grondsoorten in de verschillende landen/regio's niet altijd 100% overeenkomen (zandgrond of kleigrond in Vlaanderen is niet noodzakelijk hetzelfde als zand-/kleigrond in Nederland of Engeland). Aangezien de BDB streefzones als enige gebaseerd zijn

op (talrijke) veldproeven in België, op Belgische bodems en in Belgische weersomstandigheden werd dan ook besloten om deze verder te gebruiken in deze studie.

De volledige tabellen met de toegepaste pH-streefzones in andere landen/regio's worden weergegeven in de bijlage (zie 9).



Figuur 5: Situering van de in Vlaanderen gehanteerde pH-streefzones (BDB) t.o.v. enkele andere landen en regio's in Europa en de US

4.1.7 Invloed pH op teeltopbrengsten

Wereldwijd zorgen te zure gronden voor daling van de gewasopbrengsten en er bestaat een grote variatie in zuurtolerantie tussen de verschillende gewassen. Daarnaast is ook de mate waarin nutriënten in de bodem beschikbaar zijn voor en kunnen worden opgenomen door het gewas onder meer afhankelijk van de pH (Figuur 4). Zowel bij een te lage pH als een te hoge pH (overbekalking) worden bepaalde nutriënten minder goed opgenomen door het gewas. Daardoor kan een ongunstige pH tot een belangrijk opbrengstverlies leiden.

Voor de kwantificering van de relatieve opbrengstverliezen in functie van de bodem-pH in Vlaamse omstandigheden kan beroep gedaan worden op enkele beschikbare bronnen uit de literatuur:

- Voor akkerbouwteelten:
    - resultaten van de bekalkingsproefvelden van de Bodemkundige Dienst van België in de jaren '50 tot '70 (Tabel 3, Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Bries & Moermans, 2015).
    - Nederlands onderzoek uitgevoerd in de jaren '40 tot '60 m.b.t. bekalking en pH in de Nederlandse klei- en zandgronden (Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973).
    - Holland et al., 2019 (langetermijnproef Rothamsted, UK).
    - Liu et al., 2004 (cereals, Australia)
- Voor grasland:
    - Tumusiime et al., 2010 (langetermijnproef in Oklahoma, US).

4.1.8 Leverbaarheden: optimale pH en invloed pH op de teeltopbrengst

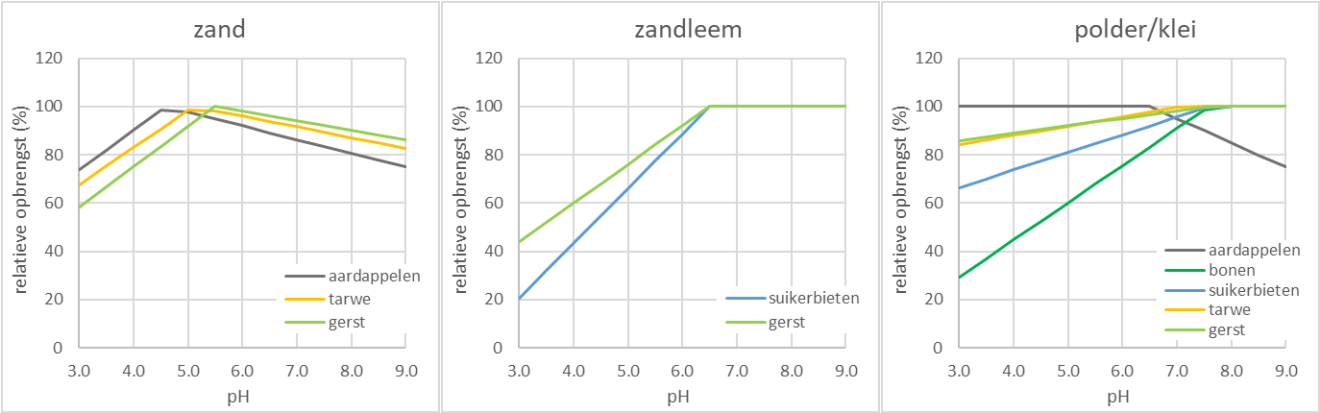
L1: Evaluatieklassen en streefzones voor de pH in functie van landgebruik, bodemtype en organische-stofgehalte: de evaluatieklassen en streefzones die best aangepast zijn aan de Vlaamse omstandigheden en meest courante teelten worden gegeven in Tabel 3.

L2: Tabellen met schatting van de potentiële opbrengstverliezen of -winsten per pH-evaluatieklasse voor de belangrijkste teelt(groep)en: op basis van de streefzones voorgesteld in 4.1.6, met de nodige aanpassingen volgens teeltgroepen zoals besproken in 4.1.6.3, en de informatie uit 4.1.7 m.b.t. de invloed van de pH op de opbrengst, werd een eerste tabel opgemaakt met, voor de belangrijkste teelten in Vlaanderen, de optimale pH in functie van de bodemtextuurklasse (bij een optimaal organische-stofgehalte) en de potentiële opbrengstverliezen of -winsten in functie van de pH, d.w.z. de pH-opbrengst-responscurve (Tabel 4 en Figuur 6). In deze fase van de studie werden nog geen gegevens teruggevonden voor leembodems. De tabel werd in een latere fase nog verder aangevuld/geoptimaliseerd op basis van beschikbare proefveldgegevens (zie 5.3) en werd dan gebruikt bij de theoretische berekening van het nitraatresidu en de -uitspoeling (zie 5.5) en bij de kosten-batenanalyse (zie 6.2).

Tabel 4: Optimale pH en pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte (o.b.v. Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Bries & Moermans, 2015; Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973; Tumusiime et al., 2010)

Teeltgroep	zand			zandleem			leem			klei/polder		
	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+
optimaal OC% akkerbouw	1,8-2,8%			1,2-1,6%			1,2-1,6%			1,6-2,6%		
aardappelen	4,6	-16	-6	5,6			6,1			6,5	0	-10
groenten	5,5			6,5			7,2			7,6	-15	0
suikerbieten	5,5			6,5	-23	0	7,2			7,6	-7	0
tarwe, triticale	5,1	-16	-4	6,1			6,6			7,1	-4	0
gerst	5,5	-16	-4	6,5	-16	0	7,2			7,6	-3	0
maïs	5,1	-23	-8	6,1			6,6			7,1		
optimaal OC% grasland	3,6-5,5%			3,6-5,5%			2,6-4,2%			3,6-5,5%		
Grasland	5,3			5,9			5,9			6,0	-14	0

rc- = regressiecoëfficiënt bij pH < optimaal
rc+ = regressiecoëfficiënt bij pH > optimaal



Figuur 6: pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte

4.2 INVLOED VAN BODEM-PH OP STIKSTOFEFFICIËNTIE, STIKSTOFUITSPOELING EN NITRAATRESIDU, KWANTIFICERING

De pH heeft zowel een directe als een indirecte invloed op de N-huishouding in de bodem: op een te zure grond is er meer risico op hoge nitraatresidu's in het najaar, door verminderde stikstofopname en geremde gewasgroei. Anderzijds kan een te hoge pH zorgen voor een snellere mineralisatie van organische stikstof en tegelijk voor een verminderde gewasgroei (en dus ook stikstofopname) door een verminderde beschikbaarheid van sporenelementen zoals ijzer, mangaan, boor, koper en zink.

4.2.1 Bodem-N-balans

De hoeveelheid minerale stikstof die na de teelt achterblijft in de bodem (nitraatresidu) en onderhevig kan zijn aan uitspoeling tijdens de winter, kan berekend worden met behulp van een minerale-bodem-N-balans. In deze balans worden de volgende processen in rekening gebracht:

$$N_{bodem} = N_{atm} + N_{boc} + N_{rest} + N_{mest} + N_{fix} + N_{cap} - N_{gewas} - N_{denit} - N_{vervl} - N_{uitsp}$$

met:

N_{bodem} = minerale N aanwezig in de bodem

N_{atm} = input van atmospherische depositie
N_{boc} = input van de mineralisatie van organische stof in de bodem
N_{rest} = input van de mineralisatie van gewasresten
N_{mest} = input van de bemesting
N_{fix} = input door N-fixatie in vlinderbloemige gewassen
N_{cap} = input van capillaire nalevering van grondwater
N_{gewas} = output door gewasopname
N_{denit} = output door denitrificatie
N_{vervl} = output door ammoniakale vervluchtiging
N_{uitsp} = output door uitspoeling

Van al deze processen heeft de pH van de bouwvoor vooral een invloed op de mineralisatie (van organische stof in de bodem en van gewasresten) en op de N-opname door het gewas en in mindere mate ook op de denitrificatie en ammoniakale vervluchtiging.

4.2.1.1 N-mineralisatie en nitrificatie

De samenstelling en de activiteit van het bodemleven wordt beïnvloed door de pH van de bodem. In eerder zure bodems (pH < 5,5) overheersen schimmels, in neutrale en basische bodems zijn bacteriën dominant (Rousk et al., 2009; Grosso et al., 2016).

Bij de mineralisatie wordt organische N in een eerste stap omgezet naar het relatief immobiele ammonium (ammonificatie) en vervolgens naar nitraat (nitrificatie). De omzetting van organische N naar ammonium zorgt voor een pH-stijging (opname van H^+-ionen), terwijl bij de verdere omzetting naar nitraat opnieuw H^+-ionen vrijgezet worden (verzuring).

Ammonificatie: organische stof (humus) + $H^+ \rightarrow CO_2 + NH_4^+$ + andere voedingselementen

Nitrificatie:

$$\mathbf{2\ NH_3 + 3O_2 -> 2\ NO_2^- + 2\ H^+ + 2\ H_2O}$$

$$\mathbf{2\ NO_2^- + O_2 -> 2\ NO_3^-}$$

De mineralisatie van organische stof verloopt in theorie sneller bij een neutrale en hoge pH. Zo ligt de optimale bodem-pH voor ammonificatie tussen 6,0 en 8,0 en voor nitrificatie tussen 7,5 en 8,0 (Aciego Pietri & Brookes, 2007). Bij een pH lager dan 6 neemt de nitrificatie af en in landbouwgronden met pH lager dan 4,5 treedt nauwelijks nog nitrificatie op. Desondanks kon er in verschillende studies uitgevoerd op verschillende bodems (zie verder) geen statistisch significant verband aangetoond worden tussen N-mineralisatie en pH. Wel werden landbouwkundig significante maar tijdelijke toenames van de N-mineralisatie na bekalking vastgesteld (Curtin et al., 1998; …). Hieronder volgt een korte oplijsting van vaststellingen in onderzoek en literatuur.

- Bries & Moermans (2015): Verse bekalking stimuleert mineralisatie (Tabel 5).

Tabel 5: Invloed van bekalking op het nitraatresidu (kg N/ha) (bron: Bries & Moermans, 2015)

	21/4/2015		17/6/2015		30/7/2015		2/9/2015	
bodemlaag	Onbekalkt	bekalkt(*)	onbekalkt	bekalkt(*)	onbekalkt	bekalkt(*)	onbekalkt	bekalkt(*)
0-30 cm	21	21	64	80	74	110	54	73
30-60 cm	16	16	49	58	55	75	130	157
60-90 cm	9	9	38	32	12	14	43	61
Totaal	46	46	151	170	141	199	227	291

Bodem: lemig **zand**; pH = 4,7; OC 1,4%
(*) bekalking 1100 zbw op 23/4/2015 + 1000 zbw najaar 2015

- Curtin et al. (1998) (Canada, leem) analyseerde 61 leembodems (pH 5,1 - 7,9) uit Canada om de invloed van pH op de N-mineralisatie te bepalen door middel van aerobe incubatie. Ze stelden vast dat de mineralisatie in bekalkte bodems 37% tot 67% hoger was dan in de niet-bekalkte bodems. Dit effect werd toegeschreven aan de afbraak van labiele organische stof bij stijging van de pH. Het gaat om een tijdelijk effect, eens de labiele organische stof afgebroken is evolueert de bodem terug naar de oorspronkelijke mineralisatiesnelheden.
- Senwo & Tabatabai (2004) (Iowa, USA, silty clay loam) vonden geen invloed van kalktoedieningen op de hoeveelheden gemineraliseerde N in incubatieproeven op 20 en 30°C. Nitrificatie werd echter wel significant gestimuleerd door de bekalking.
- Nyborg & Hoyt (1978) (Canada, zandleem tot klei) incubeerden 40 zure bodems (pH 4,0-5,6) met en zonder bekalking en vonden geen relatie tussen de bodem-pH en de N-mineralisatie na 120 dagen. Desondanks zorgde de bekalking van de bodems tot een pH van ongeveer 6,7 voor een verdubbeling van de hoeveelheid gemineraliseerde N gedurende de incubatie. In de veldproeven zorgde de bekalking voor een stijging van de opname van bodem-N met 15-42 kg N/ha in het eerste jaar en met 7-10 kg/ha in het derde jaar. Deze labo- en veldexperimenten geven aan dat de zuurtegraad van de bodem geen invloed heeft op de mineralisatie van organische N en dat, alhoewel bekalking zorgt voor een toename van de N-mineralisatie, dit meestal slechts een tijdelijk effect is. Bekalking zorgde wel voor een betere nitrificatie in de meeste bodems, en dit effect verminderde niet na verloop van tijd.
- Lyngstad (1992, enkel abstract beschikbaar) (Noorwegen, zandleem tot klei) voerde bekalkingspotproeven uit met 12 zure bodems (pH 4,7-6,0) en vond geen effect van de initiële pH op de N-mineralisatie. Bekalking echter zorgde voor een significante toename van de N-mineralisatie gedurende 3 jaar. Daarna was het effect zo goed als verdwenen.
- Pietri & Brookes (2007) (UK, silty loam) onderzochten het effect van pH op de N-mineralisatie in een lange-termijn proefveld te Rothamsted (UK), op een leembodem. Ze vonden een significant negatieve correlatie tussen pH en nitraatgehalte met een maximaal nitraatgehalte bij de laagste pH (3,7). Verder onderzoek wees uit dat de daling van het nitraatgehalte bij stijgende pH veroorzaakt werd door een toename van de gewasopname (met hogere opbrengsten) en niet door een lagere N-mineralisatie.
- Weier & Gilliam (1986) (US) onderzochten het effect van de zuurtegraad van de bodem op de mineralisatie en nitrificatie in zure bodems (pH <= 4,5) van North Carolina. Uit hun onderzoeksresultaten besloten ze dat de bekalking van deze zure gronden weinig invloed zou hebben op de N-mineralisatie.
- Bertrand et al. (2006) (Frankrijk, zandleem) vonden een significant hogere CO_2-productie in een bekalkte bodem met een pH > 7 dan in dezelfde bodem met minder of geen bekalking; ze vonden echter geen verschil in N-mineralisatie.
- Heyburn et al. (2017) (UK, grasland, zure zand) vonden dat bekalking een sterk effect had op de N-beschikbaarheid in de bodem, voornamelijk veroorzaakt door een stijging van de bodem-pH. Een hogere bodem-pH was sterk gecorreleerd met een hogere N-beschikbaarheid (nitraatgehalte). Desondanks werd er geen verband gevonden tussen bodem-pH en N-voorraad in de bodem (nvdr. waarschijnlijk omwille van de hogere gewasopname).
- Grover et al. (2017) (Australië, zandgrond met akkerbouw; kleigrond met grasland) vonden dat bekalking initieel de afbraak van organische stof in de bodem verhoogde, maar dat dit een tijdelijk effect was (<6 dagen).

Gover et al. (2017) vat de resultaten van verschillende onderzoeken met betrekking tot het effect van bodem-pH op de mineralisatie van organische stof in de bodem samen als volgt. Bekalking kan zowel een positief, negatief als geen effect hebben op mineralisatie van organische stof in de bodem. Er zijn minstens vijf manieren waarop bekalking een invloed kan hebben op de mineralisatie van organische stof in de bodem. Ten eerste kan een stijging van de pH initieel leiden tot een verhoogde oplosbaarheid van organische stof in de bodem gevolgd door een stabilisatie via Ca2+ bridging. Ten tweede verhoogt bekalking de productiviteit van veel gewassen en dus ook de hoeveelheid vers organisch materiaal dat toegevoegd wordt aan de bodem, zowel aan de oppervlakte onder vorm van gewasresten als in de bodem via rhizodepositie. Dit vers organisch materiaal vormt een gemakkelijk afbreekbaar substraat voor de bodem-micro-organismen, waardoor de mineralisatie van de organische stof die reeds aanwezig was in de bodem (native organic matter) ofwel kan dalen (omwille van preferentieel gebruik van het vers materiaal) ofwel kan stijgen (door het priming effect). Ten derde kan bekalking zorgen voor een betere bodemstructuur, wat op zijn beurt ook een invloed heeft op de mineralisatie. Een betere bodemstructuur en aggregaatstabiliteit verhoogt de fysische bescherming van de organische stof in de bodem binnen de aggregaten waardoor ze minder gemakkelijk afbreekt. Ten vierde kan een verhoging van de pH door bekalking een invloed hebben op de hoeveelheid, activiteit en/of samenstelling van de micro-organismen in de bodem, waardoor deze meer organische stof zouden kunnen afbreken. Ten vijfde tenslotte kan bekalking en stijging van de pH zorgen voor een toename van de C-gebruiksefficiëntie door de micro-organismen. In theorie zouden de micro-organismen bij een hogere pH minder C nodig hebben voor hun cellulair onderhoud.

L3.1 - Besluit:

Bekalking leidt op korte termijn (1 groeiseizoen?) tot meer N-mineralisatie in alle bodems. De percentages in de aangehaalde literatuur variëren van 0 tot 67%. Daarna is het effect van bodem-pH op de N-mineralisatie onvoorspelbaar / verwaarloosbaar. In samenspraak met de opdrachtgever werd besloten om in de kosten-batenanalyse (zie 6.2) uit te gaan van een verhoogde N-mineralisatie na bekalking van 30% gedurende 1 jaar, waarvan de helft (15%) tijdens de winter die volgt op de bekalking. Deze extra 15% mineralisatie zal dus meegeteld moeten worden voor mogelijke uitspoeling tijdens de eerstvolgende winter na toepassing van een bekalking.

4.2.1.2 Denitrificatie

Onder zuurstofarme omstandigheden kan nitraat worden gereduceerd (denitrificatie). Denitrificatie is een anaeroob microbieel proces tijdens hetwelke stikstofoxiden (nitraat, nitriet) gereduceerd worden tot gasvormige stikstofcomponenten (NO, N_2O, N_2). Denitrificerende micro-organismen worden vooral beïnvloed door temperatuur, bodemvochtgehalte en beschikbaarheid van zuurstof, beschikbaarheid van koolstof en stikstof en de pH (Skiba & Smith, 2000; Šimek & Cooper, 2002). Als eindproduct van denitrificatie ontstaat ofwel N_2 (atmosferisch stikstof) of N_2O (lachgas) en het hangt onder andere van de pH af of als eindproduct atmosferisch stikstof of lachgas ontstaat; bij lagere pH wordt meer lachgas gevormd. Bij de reductie van nitraat tot N_2(g) wordt zuurstof gevormd. Bij de denitrificatie wordt H^+ verbruikt. Dit kan dus tot pH-stijging in de bodem leiden.

Denitrificatie:

vorming van lachgas: $NO_3^- + CH_2O + H^+ \rightarrow ½\ N_2O + CO_2 + 1½\ H_2O$

vorming van stikstofgas: $6NO_3^- + 5CH_3OH \rightarrow 3N_2 + 5CO_2 + 7H_2O + 6OH^-$

L3.2: Besluit

Denitrificatie is vooral afhankelijk van bodemvochtgehalte en minder van pH. Aangezien denitrificatiehoeveelheden op zich relatief klein zijn in vergelijking met de N-mineralisatie (< 30 kg N/ha/jaar) werden deze effecten verwaarloosd in de theoretische berekeningen van 5.6 en 6.2.

4.2.1.3 Ammoniakale vervluchtiging

In organische mest en kunstmest komt stikstof vaak voor als ammonium (NH_4^+). Ammonium in de bodem kan vervluchtigen. Naast de temperatuur en de vochtigheid speelt de bodem-pH een belangrijke rol in dit proces: in contact met de lucht en vooral bij hoge pH wordt ammonium snel omgezet in ammoniakgas (NH_3), dat vervluchtigt. Ammonium is namelijk een zwak zuur. In een basisch milieu zal ammonium zich als een zuur gedragen en een waterstofion (H^+) afsplitsen. Op gronden met een pH hoger dan 7,5 à 8 wordt bemesten met ammoniumhoudende meststoffen daarom afgeraden (Braekman et al., 2014).

L3.3: Besluit

Verliezen door ammoniakale vervluchtiging vinden vooral plaats bij het gebruik van ammoniumhoudende meststoffen. Bij de mineralisatie van organische stof in de bodem wordt weliswaar in een eerste stap ook ammonium gevormd, maar deze wordt snel verder omgezet naar nitraat. Voor de theoretische berekeningen (5.6 en 6.2) zijn we er van uitgegaan dat in bodems met een hoge pH geen ammoniumhoudende meststoffen gebruikt worden, zodat de ammoniakale vervluchtiging kon verwaarloosd worden.

4.2.1.4 N-fixatie

Ook de stikstofbindende bacteriën in de wortelknolletjes van de vlinderbloemigen zijn zeer gevoelig voor de pH. Bij een pH onder de 4,8 is de stikstofbinding sterk geremd (Handboek Bodem en Bemesting).

L3.4: Besluit

Aangezien de vlinderbloemigen niet meegenomen werden bij de belangrijkste gewassen in Vlaanderen werd het effect van de bodem-pH op de N-fixatie ook niet meegenomen in de theoretische berekeningen van 5.6 en 6.2.

4.2.1.5 N-opname door het gewas

De geschatte gemiddelde N-opname en opbrengsten van de belangrijkste teelten in Vlaanderen wordt gegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Geschatte gemiddelde N-opname en opbrengsten van de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen (Tits et al., 2018; VLM, 2011; D'Haene et al., 2018; diverse bronnen, mededelingen Koen Cochez, 9/5/2019 en 23/5/2019)

teelt(groep)	N-opname kg N/ha	opbrengst	opbrengst financieel €/ha
meerjarig grasland	400	10,85 t DS/ha	1 320
maïs	250	18,0 t DS/ha	2 200
wintertarwe	280	9,3 t/ha	1 800
wintergerst	180	8,5 t/ha	1 500
aardappelen	280	55,0 t/ha	5 000
suikerbieten	320	85,0 t/ha	2 700
wortelen	200	100,0 t/ha	8 000(*)
erwten	180	12,0 t/ha	10 100(*)
bloemkool	250	26,0 t/ha	10 600(*)
prei	240	50,0 t/ha	11 250(*)

(*) gemiddelden industrie en versmarkt

Een gunstige pH bevordert in de meeste gevallen niet alleen de mineralisatie maar stelt ook de plant in staat om normaal te groeien en de geproduceerde stikstof op te nemen. In het verleden heeft de praktijk van het grondonderzoek ons overduidelijk geleerd dat op gronden met een te lage pH een normale stikstofproductie en een normale stikstofopname uitgesloten is (Boon, 1979). Ook bij te hoge pH zal geen normale stikstofreactie optreden (Boon, 1979).

Anderzijds heeft ook de gewasopname van nutriënten een invloed op de pH. Planten nemen enkel oplosbare vormen van nutriënten op, nl. als (positief of negatief geladen) ionen. Wanneer een plant positief geladen ionen (K^+, Ca^{2+}) opneemt, wisselt hij die uit met waterstofionen (H^+). Omdat planten H^+ uitscheiden van hun plantenwortels om K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} op te nemen (protonpomp), zal de wortelomgeving spontaan verzuren. Ook de opname van ammonium (NH_4^+) heeft een verzurende werking. Andersom, wanneer de plant NO_3^- opneemt, zal hij tegelijkertijd een H^+ opnemen en de bodem alkaliniseren (basisch maken). In een systeem waarin geen stikstof uitspoelt (dus alle stikstof wordt opgenomen), wordt deze verzuring of alkalinisering weer teniet gedaan door afbraak van de organische stof (consumptie van H^+) en door de nitrificatie (productie van H^+). In systemen waar stikstof uitspoelt, kunnen wel pH-veranderingen optreden. Nitraat is veel mobieler dan ammonium en kan gemakkelijk uitspoelen. Gelijktijdig met het anion kunnen ook basische kationen uitspoelen waardoor de beschikbaarheid van kalium en magnesium voor de plant daalt en de bodem uiteindelijk verzuurt.

Wheeler et al. (1997) (Nieuw-Zeeland, silt loam, clay loam) onderzochten de N-opname door grasland en klaver bij verschillende bekalkingshoeveelheden. In de 3 eerste jaren werd een toename van de N-opname met gemiddeld 24 kg/ha/jaar door gras vastgesteld. Deze toename werd toegeschreven aan een toename van de netto N-mineralisatie en was een korte-termijn effect aangezien deze toename na 3 jaar niet meer werd vastgesteld.

Pietri & Brookes (2007) (UK, silty loam) onderzochten het effect van pH op de N-mineralisatie in een lange-termijn proefveld te Rothamsted (UK), op een leembodem. Ze vonden een significant negatieve correlatie tussen pH en nitraatgehalte met een maximaal nitraatgehalte bij de laagste pH (3,7). Verder onderzoek wees uit dat de daling van het nitraatgehalte bij stijgende pH veroorzaakt werd door een toename van de gewasopname (met hogere opbrengsten) en niet door een lagere N-mineralisatie.

L3.5: Besluit

De bodem-pH heeft een belangrijke invloed op de gewasgroei en dus op de hoeveelheid N die het gewas opneemt uit de bodem. Bij een niet-optimale pH dalen de gewasgroei en -opbrengst (zie pH-responscurves in 4.1.7, Tabel 4) en dus ook de N-opname (opgegeven in Tabel 6). In deze studie werd er van uitgegaan dat de vermindering van de N-opname in functie van de pH proportioneel is met de opbrengstvermindering en dus eenvoudig kan berekend worden uit de gegevens in beide tabellen.

In 5.3 worden deze berekeningen getoetst en aangevuld worden op basis van beschikbare proefveldgegevens.

4.2.2 Nitraatresidu

Op basis van de hogerbeschreven invloed van de bodem-pH en -bekalking op de verschillende processen in de bodem-N-balans (vooral op de N-mineralisatie (korte termijn) en op de gewasopname) kan voor het nitraatresidu het volgende besloten worden:

- De bodem-pH heeft geen eenduidige invloed op de N-mineralisatie. Enkel na bekalking wordt een tijdelijke verhoging van de N-mineralisatie vastgesteld, waardoor, zeker als deze bekalking in het najaar gebeurt zonder dat er op korte termijn een gewas ingezaaid wordt, een stijging van het nitraatresidu kan verwacht worden.

- De gewasopname wordt daarentegen wel duidelijk beïnvloed door de pH. Een niet-optimale pH zorgt voor een lagere gewasopname en dus ook voor een hoger nitraatresidu, indien de bemesting dezelfde blijft.

Het in orde brengen van de bodem-pH door te bekalken kan dus op korte termijn (zeker indien de bekalking in het najaar uitgevoerd wordt) weliswaar zorgen voor een stijging van de nitraatresidu's in percelen zonder gewas of groenbedekker, maar op langere termijn zal de gunstige pH zorgen voor een betere gewasopname en een daling van de nitraatresidu's.

In combinatie met het organische-koolstofgehalte van de bodem werd door Van Overtveld et al. (2011) een significant effect van de pH op het nitraatresidu vastgesteld. Op basis van een uitgebreide statistische analyse van de nitraatresidu's gemeten in Vlaanderen stelden zij vast dat zowel het koolstofgehalte als de pH een zeer significant positief effect hadden op het nitraatresidu. Deze effecten vertonen bovendien een significant interactie-effect, zowel onderling als met de bodemtextuur: de nitraatresidu's stijgen bij stijgend koolstofgehalte en dit effect is sterker bij een hogere pH; het effect van de pH op deze stijging is bovendien veel meer uitgesproken in lichtere gronden. In Onderdeel 2 zal deze oefening opnieuw uitgevoerd worden met de recenter beschikbare data (BDB en VLM).

4.2.3 N-uitspoeling

De invloed van de bodem-pH op de N-uitspoeling komt overeen met de resultante van de bodem-N-balans in het najaar en is dus vooral afhankelijk van het effect op de N-mineralisatie enerzijds en op de gewasopname anderzijds.

Ridley et al. (2001) (weiland, zuidoost Australië, lemig zand tot zandleem) schatten dat potentiële N-uitspoeling toeneemt met gemiddeld 5±8 kg N/ha/jaar na bekalking.

4.2.4 Leverbaarheden

L3: Literatuuroverzicht van kwantificeerbare verbanden: Zie L3.1 tot L3.5 in de kadertekstjes in 4.2.1.

4.3 INVLOED VAN BEKALKING EN BEMESTING OP BODEM-PH

4.3.1 Achtergrond

De verzuring van de bodem is een natuurlijk proces dat in onze streken versterkt wordt door antropogene invloeden zoals landgebruik, ploegdiepte, bemesting met zuurwerkende meststoffen, enz. De belangrijkste natuurlijke processen verantwoordelijk voor verzuring zijn CO_2-productie door ademhaling en afbraak van organisch materiaal en salpeterzuurvorming bij nitrificatieprocessen. De bodem beschikt over bufferprocessen die deze verzuring tegengaan. De buffercapaciteit van de bodem is echter te beperkt om de sterk toegenomen antropogene verzuring te kunnen bufferen. Om de pH op peil te houden moet dan ook, in functie van het bodemtype, regelmatig bekalkt worden.

Als de pH van een perceel te laag is, wordt een herstelbekalking geadviseerd om de pH terug in de streefzone te krijgen. Als op een akker een pH gemeten wordt die binnen de streefzone valt, wordt vaak toch nog een bekalkingsadvies gegeven om de pH gedurende 3 jaar binnen de streefzone te houden. Dit wordt een onderhoudsbekalking genoemd. Deze moet de natuurlijke verzuring van de bodem compenseren.

4.3.2 Kalksoorten en hun werking

Bron: Boerengoed.nu (https://boerengoed.nu/index.php/voorbeeld-pagina/informatie/handleiding-kalkmeststoffen/)

In de natuur wordt calcium bijna altijd als carbonaatkalk ($CaCO_3$, calciumcarbonaat) gevonden. Het komt o.a. veelvuldig voor in kalksteen, kalkmergel en schelpen. Die materialen kunnen gemalen worden en zo gebruikt. In de klassieke landbouw worden ze ook als grondstof gebruikt om sneller werkende kalkmeststoffen mee te fabriceren.

Kalkmergel wordt gedolven in mergelgroeven, o.a. in Zuid-Limburg. Na maling verkrijgt men een tamelijk vochtig product (10 tot 20% vocht), dat bestaat uit zand, leem en calciumcarbonaat. Het is goedkoop, werkt zeer zacht en langzaam en is vooral geschikt voor lichte gronden.

Landbouwkalk, ook wel koolzure landbouwkalk genoemd, wordt verkregen door kalkmergel te zuiveren, te drogen en zeer fijn te malen. Door de fijnheid werkt deze kalk sneller dan kalkmergel. Het product is tamelijk goedkoop en overal verkrijgbaar.

Voor de productie van landbouwpoederkalk of gebluste landbouwkalk of zakjeskalk wordt carbonaatkalk door verhitting omgezet in calciumoxide of ongebluste kalk of gebrande kalk. Dit is een aggressief product dat dan met water behandeld wordt ("geblust") waardoor er calciumhydroxide of gebluste kalk ontstaat. Het resultaat is een duur en snel werkend kalkproduct.

Dolomiet is een gesteente met, naast een hoog gehalte aan calciumcarbonaat, een flinke portie magnesiumcarbonaat en aardig wat sporenelementen. De meststof met dezelfde naam wordt eruit verkregen door malen en drogen. In België en Nederland wordt dolomiet ontgonnen met verschillende gehaltes aan magnesium. Door verschillende mengingen van deze producten ontstaan diverse producten met verschillende magnesiumgehaltes, bijvoorbeeld in het gamma van Dolokal.

Zeewierkalk (maerl) is afkomstig van microfossiele resten van algen (=coccolieten) en werkt zeer zacht. Het is in verhouding tot andere kalksoorten echter erg duur.

Er zijn ook heel wat nevenproducten afkomstig van de landbouwindustrie of de voedingsnijverheid die een bekalkingswaarde hebben, zoals schuimaarde of slib. Schuimaarde is een nevenproduct van de suikerfabrieken. Het bevat naast calciumcarbonaat ook nog organische stof en voedingselementen zoals stikstof, fosfor en magnesium. Daarnaast zijn er ook nog organische producten die de pH van de bodem verhogen, zoals kippenmest, champignoncompost en gft-compost. Andere dierlijke mesten werken ongeveer neutraal.

Het effect van kalksoorten op de bodem-pH wordt uitgedrukt als "zuurbindende waarde" (zbw). In de handel zijn er tal van kalksoorten te koop die een goede werking hebben op de pH van de bodem. Kalk onder carbonaatvorm is de meest gebruikte kalk. Deze kalksoort is niet agressief voor de plant en de gebruiker. Indien de magnesiumreserve van de bodem te laag is kan ervoor gekozen worden om een magnesiumrijke kalk te gebruiken. De magnesium die in deze kalk aanwezig is in carbonaatvorm, werkt trager dan magnesium die aanwezig is in meststoffen, bv. in sulfaatvorm.

De werking van de verschillende kalksoorten hangt, naast de samenstelling en zbw, af van een reeks andere kenmerken zoals fijnheid, vochtgehalte, reactiviteit en toepassingswijze.

In Tabel 7 worden de belangrijkste kalksoorten, hun samenstelling en eigenschappen opgelijst.

Tabel 7: Kalksoorten

Naam	ZBW	MgO %	N g/kg	P_2O_5 g/kg	vorm	fijnheid % <0,16 mm
Gebrande kalk (oxydevorm)						
Magnesiumkalk	110	35	0	0		
Gebluste kalk (hydroxydevorm)						
Gebluste poederkalk Eclat	74	0.25	0	0	droog	
Carbonaatkalken						
Ankal	50		0	0	nat	90
Biokal	>40	-	0	0		
Borgakal (kalkmergel)	53	1.75	0	0	nat	60
Borgakal+ (kalkmergel)	54	4.75	0	0		
DCM Zeewierkalk Maerl	57	4	0	0		
Dolokal	54	1.25	0	0	droog	90
Dolokal extra	55	2.5	0	0	droog	95
Dolokal Supra	57	4.75	0	0	droog	90
Duwa Dolomiet	60	4.75	0	0		
Duwa Mixte	57	1.25	0	0		
Duwa-Mag	57	4.5	0	0		
Emkal	53	0	0	0	droog	90
Groen-kalk (korrel)	50	15	0	0		
Limkal	50	0	0	0	vochtig	50
Lithomagnesium (zeewierkalk)	50	4.5	0	0		
Lithotamnium (zeewierkalk)	53	1.325	0	0		
Maerl koraalalgenkalk	45	6	0	0		
Magkal	54	4.25	0	0	nat	80
Magnesiakalk	58	1.25	0	0	droog	90
Mergel	>35	-	0	0		
Miramag	55	19	0	0		97
Schuimaarde (Neutrafertil)	>20	0.5	4-6	10-20	nat	
Vitakal (kalkmergel)	50	-	0	0	nat	70
Zeewierkalk	50	4	0	0	gekorreld	90

4.3.2.1 Fijnheid

De fijnheid van de kalksoort bepaalt de snelheid van werking. Deze fijnheid wordt meestal uitgedrukt in de fractie < 0,16 mm. Op sterk zure gronden, waar men een snelle stijging van de pH wil realiseren, is het van belang een kalksoort te kiezen met een hoge fijnheid (een hoge fractie < 0,16 mm). Indien er een kalk of een kalkhoudend product in grove brokken gestrooid wordt, ontstaat er een heterogene pH op het veld (Deckers & Bries, 2013).

4.3.2.2 Vochtgehalte

Hoe droger de kalkmeststof is, hoe hoger de werkingssnelheid. Hoe lager het vochtgehalte des te beter de kalkmeststoffen te verdelen zijn. Het vochtgehalte is tevens bepalend voor het type strooier dat kan gebruikt worden. Met vijzelstrooiers en speciale pendelstrooiers voorzien van een stofscherm zijn fijne, droge kalkmeststoffen uitstekend en gelijkmatig te verdelen. Vochtige kalkmeststoffen worden met een schotel- of schijvenstrooier op het land gebracht en zijn iets moeilijker te verdelen (Nutrinorm1,

https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/Paginas/Kalkmeststoffen-De-eigenschappen-van-kalkmeststoffen.aspx#.XNlNyo4zbcs).

4.3.2.3 Reactiviteit

De reactiviteit van een kalkmeststof is een maat voor welk deel van de neutraliserende waarde van een kalkmeststof binnen 10 minuten tot werking komt. De reactiviteit wordt bepaald aan de hand van een Sauerbeck-test. Hierbij wordt de kalkmeststof opgelost in zoutzuur, waarna er na twee en tien minuten wordt gekeken in hoeverre de kalkmeststof verweerd is. In de bodem staan deze perioden gelijk aan een maand en een jaar. Zo kan worden bepaald hoe snel een kalkmeststof zijn werk doet (Nutrinorm1, z.d., https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/Paginas/Kalkmeststoffen-De-eigenschappen-van-kalkmeststoffen.aspx#.XNlNyo4zbcs).

4.3.2.4 Toepassing

Doordat kalk weinig beweeglijk is in de bodem krijg je pas een goed resultaat als de kalk goed met de grond vermengd wordt. Als er enkel een onderhoudsbekalking nodig is, kan de geadviseerde bekalking gestrooid worden na het ploegen, waarna de kalk ingeëgd of ingefreesd kan worden. Indien de grond sterk zuur is, wordt de bekalking best opgesplitst in 2 delen. De eerste helft van de geadviseerde bekalking wordt vóór het ploegen (bv. in de stoppel) ingewerkt en de andere helft na het ploegen. Deze tweede toediening bevordert een goede structuur van de kiemlaag, wat de opkomst van bijvoorbeeld suikerbieten zeker ten goede kan komen. Op weiden wordt best niet te veel kalk in één keer gestrooid. Dit wordt beperkt tot maximaal 1200 zbw per hectare.

4.3.3 Effect van meststoffen op de pH

Minerale meststoffen verzuren de bodem. Maar de mate waarin is zeer verschillend. Naast stikstof zijn het zwavelgehalte en de samenstelling van de vulstof in de meststof bepalend voor de verzuring. Magnesium heeft een bekalkende werking en zorgt zo voor een minder verzurende werking in de bodem. Zwavel geeft een meststof juist een sterk verzurend karakter (Nutrinorm2).

De verzurende werking wordt uitgedrukt in basenequivalenten per 100 kg stikstof en per 100 kg meststof. Een meststof wordt als verzurend aangemerkt als de waarde beneden de -5 ligt. Hoe sterker negatief, hoe sterker de verzurende werking. 1 kg basenequivalent is te compenseren met 1 kg nw (neutraliserende waarde), bv. 1 kg magnesium.

Het basenequivalent is te berekenen met behulp van de Sluijsmans formule (gehalten in procenten):

$1 * CaO + 1,4 * MgO + 0,6 * K_2O + 0,9 * Na_2O – 0,4 * P_2O_5 – 0,7 * SO_3 – 0,8 * Cl – n * N$

waarbij n = 0,8 voor bouwland en 1,0 voor grasland. Er wordt in de formule geen onderscheid gemaakt naar de stikstofvorm (Nutrinorm2). Opgepast, deze formule houdt geen rekening met de werking van eventuele vulstoffen.

Tabel 8: Verzurende werking (uitgedrukt in basenequivalenten (BE) per 100 kg meststof) van minerale meststoffen (bronnen: BDB, Nutrinorm2)

Naam	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	SO_3	Cl	BE per 100 kg meststof
	%	%	%	%	%	%	%	%	
Ammoniumnitraat	27	0	0	0	0	0	0	0	-16
Ammoniumnitraat + 1MgO	34	0	0	1	0	0	0	0	-14.4
Ammoniumnitraat + 4MgO	27	0	0	4	0	0	0	0	-9.5
Ammoniumsulfaat (zwavelzure ammoniak)	21	0	0	0	0	0	60	0	-63
Ammoniumsulfaatsalpeter (ASS)	26	0	0	0.3	0	0	32.5	0	-49
Calciumnitraat	16	0	0	0	26.3	0	0	0	12
Chilinitraat (chilisalpeter)	16	0	0	0	0	35	0	0	17
Chloorkali (chloorpotas) 40%	0	0	40	0	0	15	12	36	0
Chloorkali (chloorpotas) 40% + 6MgO	0	0	40	6	0	4	12	36	0.5
Chloorkali (chloorpotas) 60%	0	0	60	0	0	0.5	0	46	0
DAP	18	46	0	0	0	0	3.5	0	-38
Kalkammonsalpeter (KAS)	27	0	0	0	12	0	0	0	-15
Kalkammonsalpeter (KAS) + MgO	27	0	0	4	6	0	0	0	-15
Kalkcyanamide (kalkstikstof)	20	0	0	0	50	0	0	0	40
Kieseriet 25%	0	0	0	25	0	0	50	0	0
Kieseriet 27%	0	0	0	27	0	0	55	0	0
Landbouwzout	0	0	0	0	0	50	0	50	0
Magnesamon	22	0	0	7	10.5	0	0	0	-1
Magnesiet	0	0	0	90	0	0	0	0	126
Magnesiumkainiet	0	0	11	5	0	27	10	0	0
Magnesiumsulfaat (bitterzout)	0	0	0	16	0	0	32	0	0
Mono-ammoniumfosfaat (MAP)	12	52	0	0	0	0	0	0	-37
Monokaliumfosfaat (MKP)	0	52	34	0.0049	0	0	0	0	0
Kaliumnitraat (kalisalpeter)	13	0	45	0	0	0	0	0	9
Kaliumsulfaat (zwavelzure kali)	0	0	50	0	0	0	45	0	-1
Nitromag	22	0	0	7	12	0	0	0	-1
Patentkali	0	0	30	10	0	0	42	0	0
Superfosfaat	0	18	0	0	0	0	23		-2
Tripelsuperfosfaat	0	45	0	0	0		3		0
Ureum	46	0	0	0	0	0	0	0	-46
Vloeibare stikstof	30	0	0	0	0	0	0	0	-30
Vloeibare ammoniak	82	0	0	0	0	0	0	0	-82

4.3.4 Leverbaarheden

L4: Lijst van de in Vlaanderen meest gebruikte (organische en andere) meststoffen en kalksoorten, met hun samenstelling en werking (zbw of be): zie Tabel 7 en Tabel 8. Voor de kostprijs van de kalk werden kleinschalige bevragingen uitgevoerd bij landbouwers en verdelers. Op basis hiervan en in samenspraak met de opdrachtgever (cfr. e-mail van 24/7/2019) werd voor de berekeningen in 6.2 (kosten-batenanalyse) uitgegaan van een gemiddelde prijs van product+toediening van 60 €/ton kalk (aan gemiddeld 50% zbw).

5 ONDERDEEL 2: INSCHATTING VAN HET EFFECT VAN DE VERBETERING VAN DE BODEM-PH OP DE STIKSTOFEFFICIËNTIE, STIKSTOFUITSPOELING EN HET NITRAAT-N-RESIDU

In dit onderdeel werd ingeschat wat het effect van de bodem-pH is op het nitraat-N-residu en hoeveel stikstof er theoretisch minder zou uitspoelen indien de pH op de Vlaamse percelen geoptimaliseerd zou worden (ceteris paribus). De doorrekening gebeurde rekening houdend met de resultaten uit Onderdeel 1.

5.1 BESCHIKBARE DATA

5.1.1 Datasets

Voor dit onderzoek werden *de databanken gekoppeld aan verschillende BDB-expertsystemen* uitvoerig benut. Hieronder wordt voor elk van deze expertsystemen kort een beschrijving gegeven van de beschikbare data (gemeten parameters, aantallen, periode).

- N-INDEX: expertsysteem voor de stikstofbemesting dat rekening houdt met het minerale-stikstofgehalte in de wortelzone, bodemprocessen en voorgeschiedenis van het perceel (Geypens et al., 1994). Naast nitraat- en ammoniumstikstof (0-90 cm, per laag van 30 cm) bevat deze dataset ook textuur-, pH- en organische-koolstofgegevens. Daarnaast worden via het inlichtingsformulier ook perceels- en teeltgegevens verzameld. Voor de periode 2011-2017 bevat deze databank gegevens van meer dan 330.000 percelen.
- EVANIR: expertsysteem voor de meting en evaluatie van de hoeveelheid reststikstof in het najaar (0-90 cm per laag van 30 cm), inclusief advisering voor de beperking van eventuele residu's; voor een beperkt deel van deze dataset beschikken we naast reststikstof ook over pH- en organische-koolstofgegevens. Voor de periode 2011-2017 bevat deze databank gegevens van meer dan 300.000 percelen. Deze databank bevat de nitraatresidu's die op vraag van BDB-klanten genomen worden in het kader van een beheerovereenkomst, derogatie en als opvolg- of tegenstaal.
- BEMEX: expertsysteem dat op basis van de grondontleding van de bouwvoor een uitspraak doet over de bemesting van de belangrijkste macronutriënten (N, P, K, Mg, Na) en spoorelementen (B, Cu, Co) inclusief bekalking (Vandendriessche et al., 1996). Deze dataset bevat per perceel gegevens over textuur, pH, koolstofgehalte, P-, K-, Ca-, Mg- en Na-gehaltes (soms ook gehaltes van spoorelementen), alsook perceelskarakteristieken en teeltgegevens. Voor de periode 2011-2017 bevat deze databank gegevens voor meer dan 286.000 percelen.

Daarnaast beschikt de Bodemkundige Dienst van België ook over een zeer uitgebreide *proefveldendatabank*. Deze databank bevat zowel bodem- als gewasanalyses van proefvelden die sinds het ontstaan van de BDB in 1946 werden/worden uitgevoerd. In het kader van dit onderzoek werden de gegevens geanalyseerd van een 66-tal bekalkingsproeven aangelegd tussen 1952 en 1968 in verschillende bodemtypes (leem, zandleem, zand) en met verschillende teelten (9 proefvelden aardappelen, 8 proefvelden suikerbieten, 11 proefvelden voederbieten, 8 proefvelden tarwe, 4 proefvelden gerst, 16 proefvelden haver, 5 proefvelden rogge, 1 proefveld erwten, 1 proefveld klaver, 3 proefvelden raaigras en 12 proefvelden meerjarig grasland (maai- en graasweiden)).

5.1.2 Teelten

De resultaten van de hierna volgende analyses werden steeds opgedeeld volgens teelt(groep)en. Deze indeling is gebaseerd op de hoofdteelt die op het perceel aanwezig was in het afgelopen teeltseizoen, voorafgaand aan de meting van het nitraatresidu.

Omdat het onmogelijk is om voldoende relevante en representatieve gegevens terug te vinden voor alle teelten in Vlaanderen (pH-responscurves, N-opname, opbrengstgegevens, nitraatresidu-cijfers, …) werden de hierna volgende analyses beperkt tot de belangrijkste teelten op basis van hun areaal, nl. grasland, maïs, tarwe, aardappelen, suikerbieten en gerst (in volgorde van afnemende arealen). Samen vertegenwoordigen deze teelten 87% van het landbouwareaal in Vlaanderen in 2018 (Departement Landbouw & Visserij, https://lv.vlaanderen.be/nl/nieuws/voorlopige-arealen-landbouwteelten-uit-de-verzamelaanvraag-2018). Aangezien groenten een belangrijke bijdrage leveren aan de nitraatuitspoeling naar grond- en oppervlaktewater, met gemiddeld relatief hoge nitraatresidu's, worden echter ook enkele belangrijke groenteteelten meegenomen (erwten, wortelen, bloemkool en prei), voor zover er voldoende representatieve gegevens m.b.t. deze teelten beschikbaar zijn.

5.2 STAP 1: HUIDIGE SITUATIE VAN DE LANDBOUWPERCELEN IN VLAANDEREN

5.2.1 Aanpak en gebruikte data

De huidige situatie in Vlaanderen met betrekking tot bodem-pH in landbouwpercelen werd in kaart gebracht en geanalyseerd op basis van de BEMEX-databank met de standaardgrondontledingen. Voor de interpretatie van de gegevens in deze databanken werden de in Onderdeel 1 opgestelde evaluatieklassen en streefzones toegepast.

Voor de situatie van het nitraatresidu werden, naast de nitraatresidu-databank van de VLM, ook de resultaten van de laatste 8 jaar (2011-2017) uit de EVANIR-databank gebruikt. De cijfers werden verwerkt per jaar, telkens gerelateerd aan de weersomstandigheden. De geldende bemestingsnormen van de betreffende jaren zijn voor de belangrijkste teelten niet gewijzigd gedurende deze periode.

De resultaten worden cartografisch voorgesteld en verdere analyses zoals berekening van gemiddelden, spreiding, frequentieanalyses enz. werden uitgevoerd op verschillende schaal- en aggregatieniveau's.

5.2.2 pH in Vlaanderen: historiek

Bron: Vandendriessche et al., 2016.

In 1982 rapporteerden Alaerts et al.: “De zuurheidstoestand en de kalkreserve is in 1981-1982 t.o.v. 1974-1976 licht verbeterd op de lemige gronden, in gebruik als akker of weide. In het poldergebied, de Vlaamse zandstreek, de Kempen, de Ardennen en het Land van Herve werd deze gunstige evolutie niet waargenomen.”

In de periode 1982-1984 werd, globaal voor gans België, het laagste percentage te zure akkerpercelen bereikt sinds verschillende jaren, terwijl het aantal akkers met te hoge pH tot een relatief maximum opklom. Piot (1984) schreef deze evolutie toe aan de toenemende toepassing van bekalking en aan het groeiende suikerbietenareaal. De suikerbietenvelden werden immers normaal zeer goed voorzien van kalk omdat een te lage pH kon leiden tot aluminiumtoxiciteit. Bovendien zorgde de verwerking van suikerbieten in de suikerfabrieken voor de nevenproductie van grote hoeveelheden schuimaarde, die op de velden werd

toegediend als bodemverbeteraar, wat vooral zichtbaar was in de leemstreek in de omgeving van de suikerfabrieken.

In 1985 keerde deze evolutie echter opnieuw om (Boon en Geypens, 1986) en steeg het aantal te zure percelen opnieuw, vooral in de Vlaamse Zandstreek en de Zandleemstreek. Voor weilanden werd er globaal geen verandering vastgesteld t.o.v. de periode 1972-1976; het aantal te zure weilandpercelen was licht gestegen in de Kempen, de Zandleemstreek en de Leemstreek, en licht gedaald in de Vlaamse Zandstreek.

Tijdens de latere jaren '80 was er geen duidelijke trend in de cijfers vast te stellen (Pauwels *et al.*, 1988; Vanongeval *et al.*, 1996) en bleef een te lage pH-toestand een structureel probleem voor een groot percentage van onze landbouw- en vooral akkerbouwgronden. De Bodemkundige Dienst besliste daarom vanaf 1989 haar bekalkingsadviezen bij te stellen met de expertise die zij uit haar statistieken en proefvelden haalde, zoals het hoort bij een dynamisch en wetenschappelijk onderbouwd bekalkingsexpertsysteem zoals BEMEX.

Het was immers duidelijk dat de verzuring als gevolg van zure neerslag en het toenemend gebruik van zuurwerkende meststoffen sterk was toegenomen ten opzichte van de periode waarin het gros van de bekalkingsproefvelden was aangelegd. Door het aanhouden van de diepere ploegdiepte moest bovendien steeds opnieuw een groter volume grond ontzuurd worden.

Vanaf 1989 werd dan ook bij het opstellen van het bekalkingsvoorschrift, naast de herstelbekalking, ook een onderhoudsbekalking in rekening gebracht (Vanongeval *et al.*, 1996). Uit de statistieken vanaf de periode 1992-1995 blijkt dat deze werkwijze vruchten heeft afgeworpen: in elke landbouwstreek was het percentage percelen met een gunstige pH gestegen en het percentage percelen met een te lage pH gedaald t.o.v. de vorige periode. In de periodes 1992-1995 en 1996-1999 bleven er echter steeds meer dan 40 % van de akkerpercelen met een suboptimale pH-toestand. Gedeeltelijk werd dit verklaard door het feit dat veel percelen net bemonsterd en geanalyseerd worden met het oog op het verkrijgen van een wetenschappelijk gefundeerd bekalkingsadvies. Op meer dan 10 % van de percelen echter werd de pH als laag tot sterk zuur beoordeeld, wat betekent dat er in het verleden te weinig aandacht werd geschonken aan de bekalking, met opbrengstverliezen als gevolg (Vanongeval *et al.*, 2000). Zeker voor de eerstvolgende teelt konden in deze gevallen geen optimale gewasopbrengsten behaald worden omdat een herstelbekalking voor deze teelt te laat kwam (Tits *et al.*, 2016). Anderzijds werd in de periode 1996-2000 ook vastgesteld dat in 23 % van de akkers en bijna 45 % van de weilanden de pH boven de streefzone lag, met alle gevolgen van dien voor de opneembaarheid van bepaalde voedingselementen zoals magnesium, mangaan en boor.

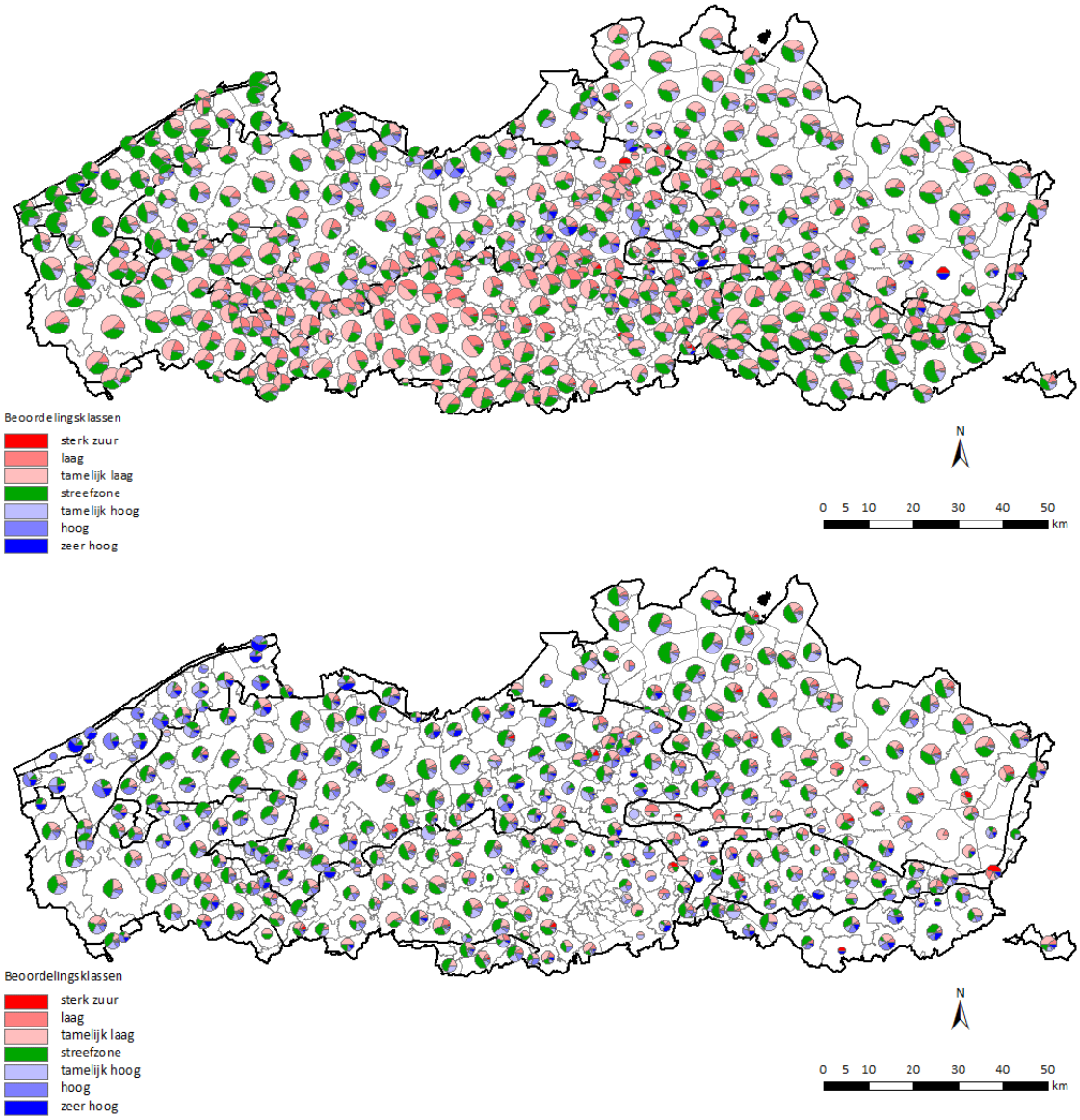
In de periode 2000-2003 werd in België het laagste percentage percelen met een pH beneden de streefzone ooit bereikt, maar ook het hoogste percentage overbekalkte percelen. In de periodes daarna steeg het percentage te zure percelen opnieuw geleidelijk, zowel bij de akker- als bij de weilandpercelen, om te eindigen op ongeveer 50 % voor akkers en 30 % voor weilanden in de laatst gerapporteerde periode (2012-2015). De economische crisis is hier mede de oorzaak van, waardoor op sommige landbouwbedrijven, weliswaar onterecht, bespaard wordt op kalk.

5.2.3 pH in Vlaanderen: huidige situatie (van 2012 tot heden)

Voor de interpretatie van de huidige situatie van de pH in Vlaanderen worden niet de absolute pH-waarden voorgesteld. Dit zou een vertekend beeld geven van de situatie, aangezien optimale pH-waarden variëren in functie van het bodemtype en het organische-stofgehalte (zie 4.1). Daarom wordt aan de absolute waarden een beoordelingscijfer toegewezen op basis van de 7 beoordelingsklassen die opgesteld werden in functie van bodemtextuur en organische-stofgehalte (zie Tabel 3). In de hierna volgende kaartjes en figuren wordt steeds gewerkt met deze beoordelingsklassen, zodat de cijfers onderling vergelijkbaar zijn.

Een andere belangrijke kanttekening bij onderstaande figuren is dat het ontledingen betreft van bodemstalen die genomen werden met het oog op het bekomen van een bemestings- en bekalkingsadvies. Dit houdt in dat het normaal de bedoeling is om op basis van het advies (zeker bij pH onder de streefzone) een bekalking uit te voeren. Zeker in de klasse 'tamelijk laag' kan de pH met een bekalking hersteld worden. In de praktijk zal dit dan ook meestal gebeuren, alleen hebben we geen zicht op het effectief uitvoeren van de bekalking.

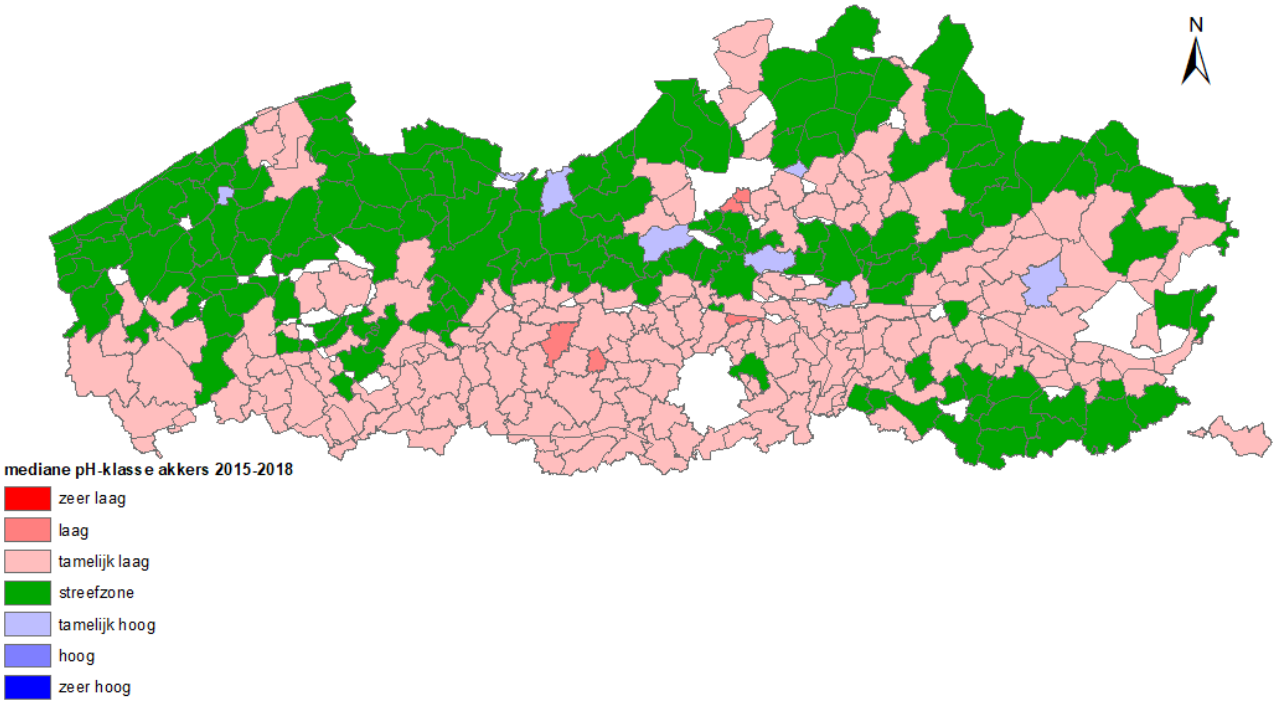
In de periode 2012-2015 was de pH zowel op akkers als op weilanden gedaald t.o.v. de vorige periode. Bijna 50% van de akkers en 29% van de weilanden had een pH lager dan de streefzone. Zeker op akkers in de Zandleem- en Leemstreek was deze daling duidelijk. In de Zandleemstreek lag de pH op 60% van de akkers onder de streefzone, t.o.v. 42% in de vorige periode (2008-2011). In de Leemstreek was dat 43% t.o.v. 30% in de vorige periode (bron: Tits et al., 2016).

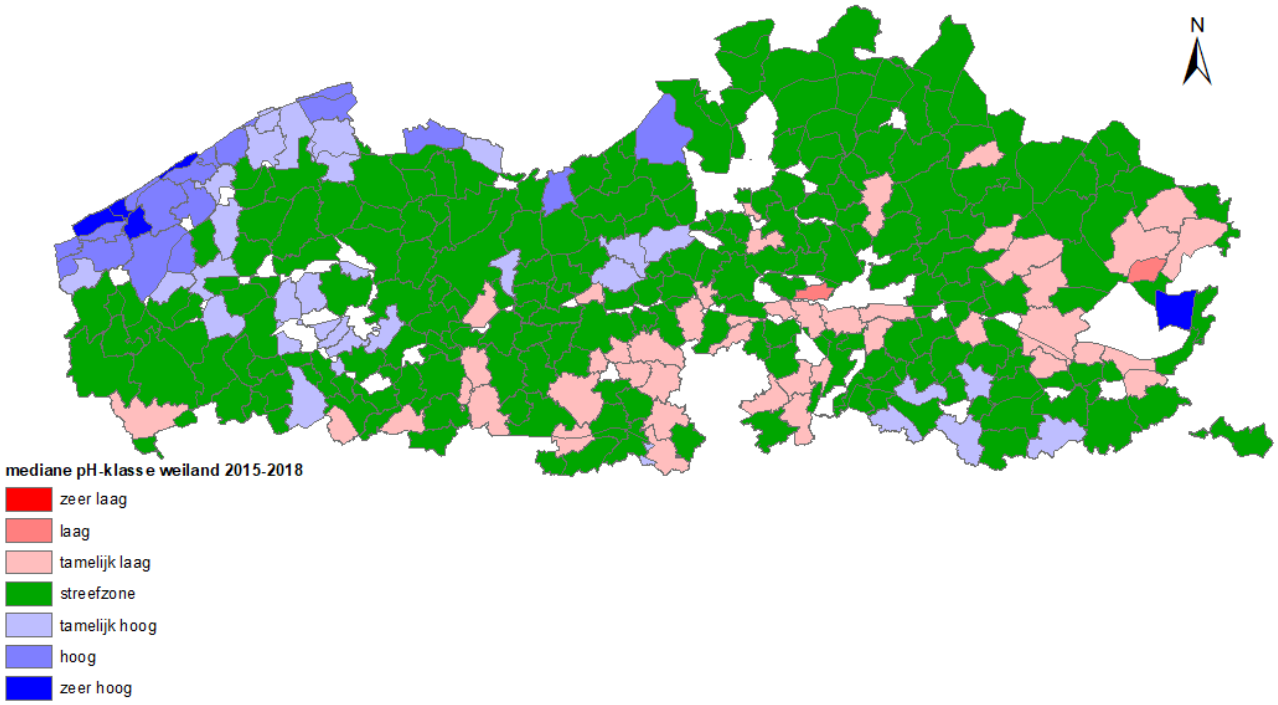


Figuur 7: Procentuele verdeling van de akkerbouw- (boven) en weiland- (onder) stalen in 7 beoordelingsklassen per fusiegemeente (eventueel opgesplitst naar landbouwstreek) voor de pH; gemeenten met minder dan 10 stalen worden niet getoond (Tits et al., 2016)

In Figuur 8 wordt de mediane pH-beoordelingsklasse per fusiegemeente*landbouwstreek voorgesteld voor akkers en weilanden. Hieruit kan afgeleid worden dat akkerpercelen met een te lage pH vooral in het zuidwestelijk deel van Vlaanderen voorkomen. Voor weilandpercelen liggen de streefzones voor de pH algemeen lager dan voor akkers. We zien dan ook dat voor weilanden gemiddeld een hoger percentage van de percelen binnen de streefzone valt of zelfs hoger (meer groene en blauwe kleur in de kaartjes). De belangrijkste zone met te lage pH's voor weilanden situeert zich vooral rond Bree en Maaseik. In de Polders en in de streken rond Diksmuide, Roeselare, Antwerpen en Sint-Truiden (leemstreek) ligt de pH zelfs aan de hoge kant (overbekalking!).

Let wel, de kleuren op de kaartjes geven de mediane pH-beoordelingsklasse weer. In de individuele velden per fusiegemeente kunnen ook andere pH-klassen voorkomen.

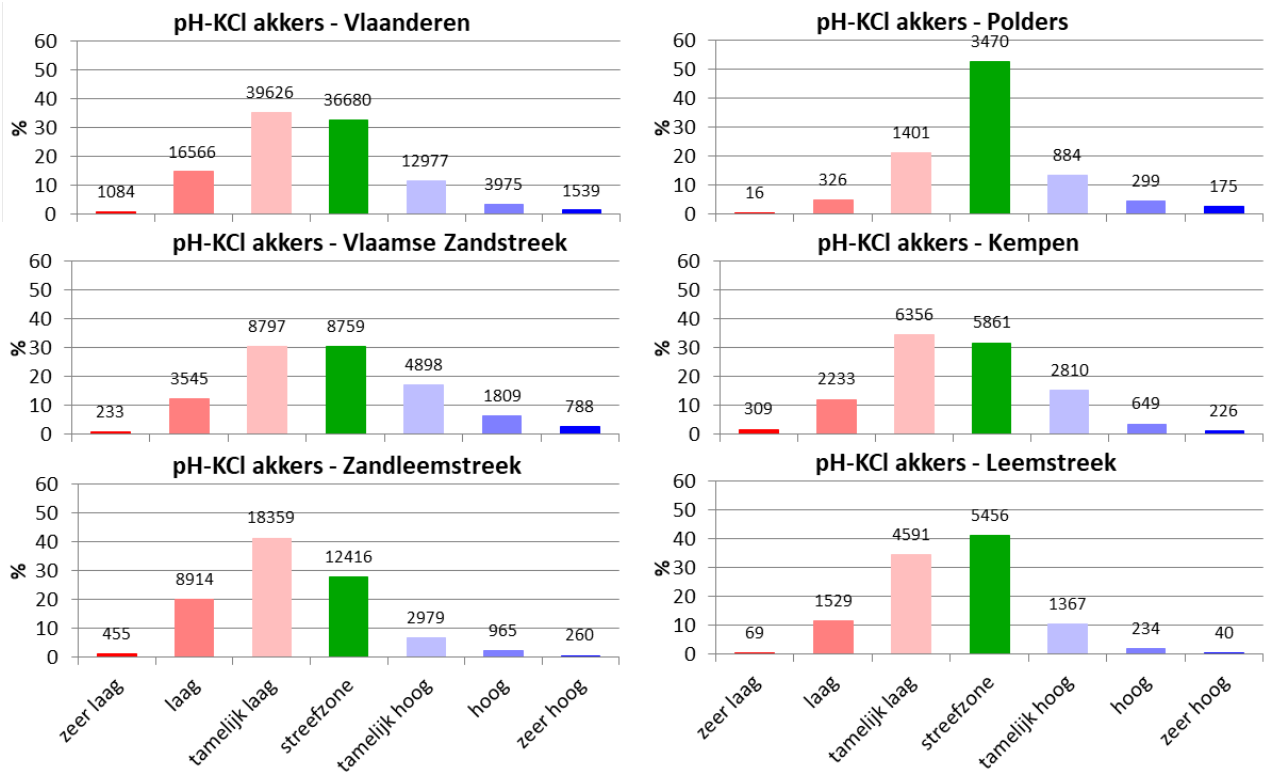




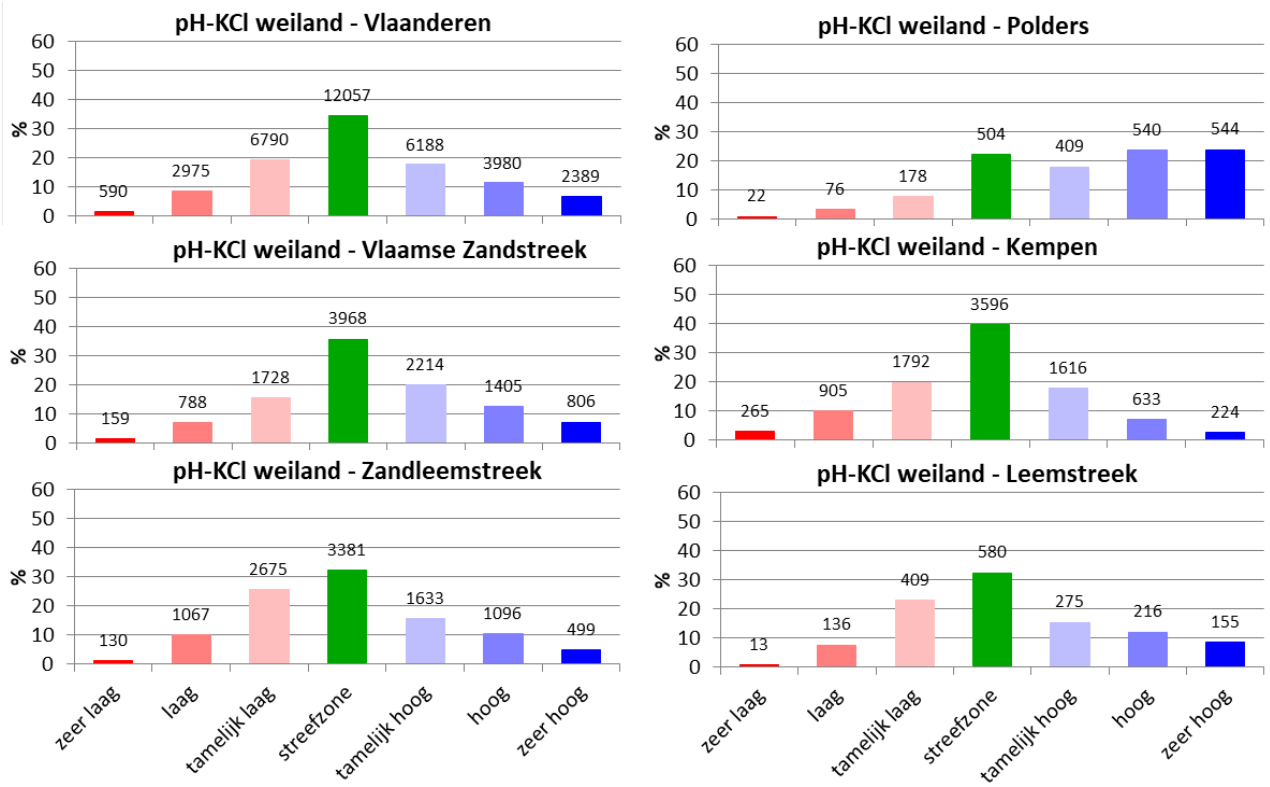
Figuur 8: Mediane pH-beoordelingsklasse van akker- (boven) en weiland- (onder) percelen per fusiegemeente*landbouwstreek voor de periode 2015-2018; gemeenten met minder dan 10 stalen worden niet getoond (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)

In Figuur 9 tot Figuur 15 worden de procentuele verdelingen van de bodemstalen weergegeven, respectievelijk voor akkers en weilanden, per landbouwstreek, per provincie, per bodemtextuurklasse en per teeltgroep. Voor

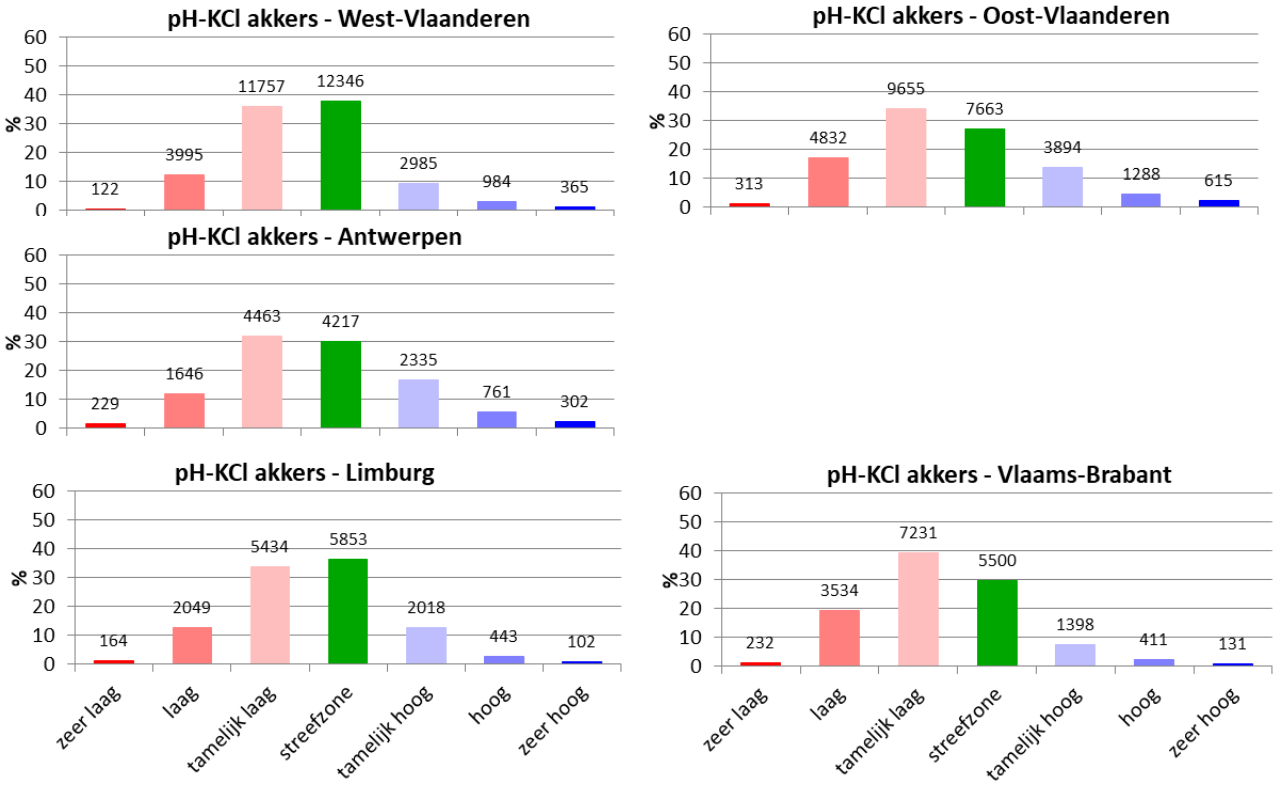
deze laatste indeling (per teeltgroep) is het belangrijk te vermelden dat het steeds gaat om de eerste teelt die volgt na de bodemstaalname.



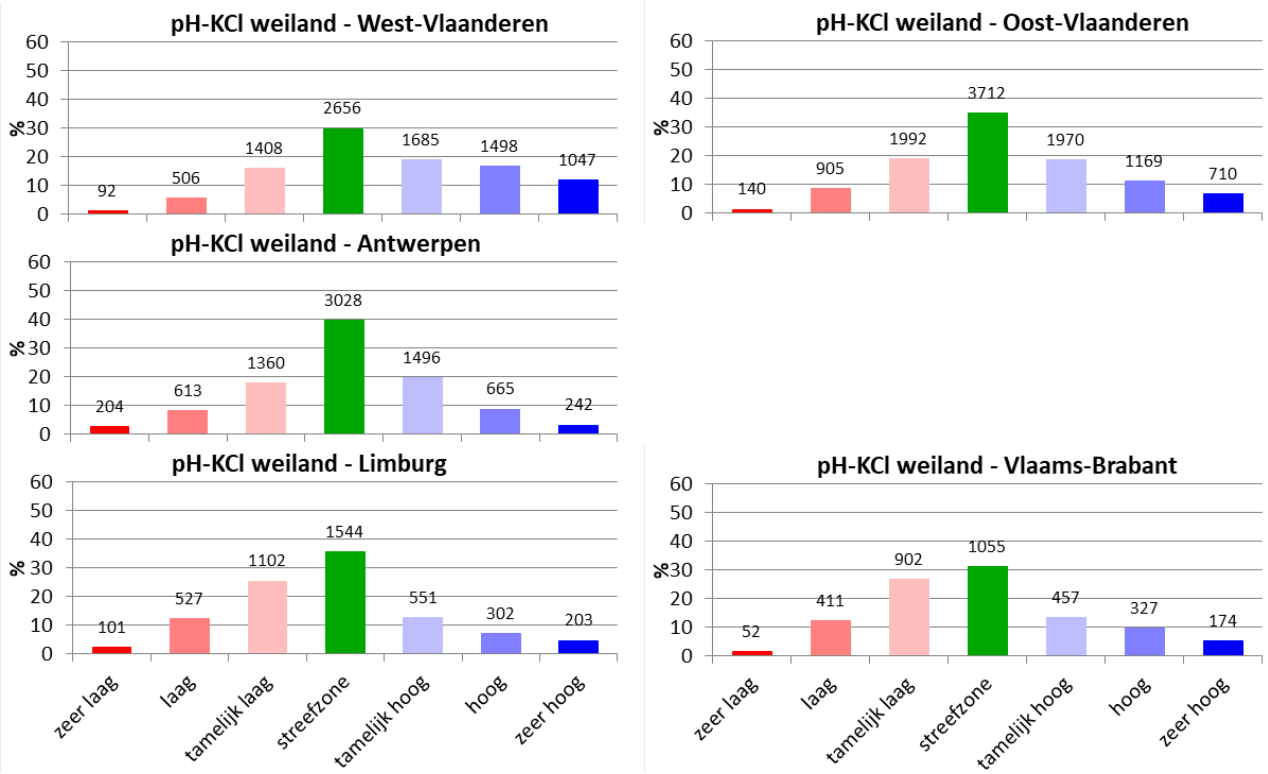
Figuur 9: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen voor gans Vlaanderen (linksboven) en per landbouwstreek; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



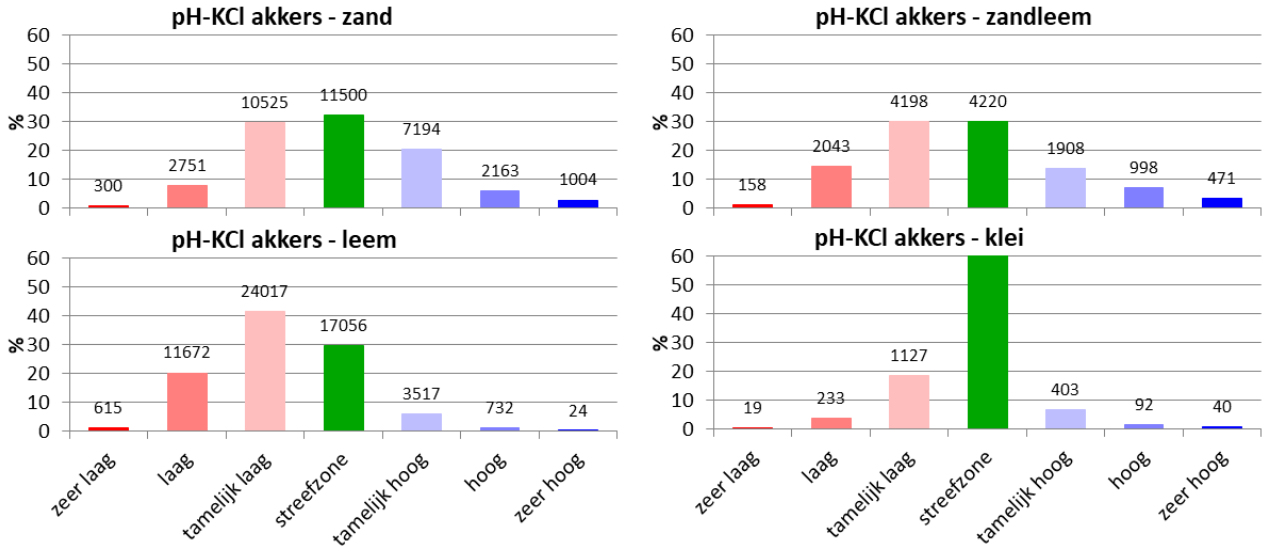
Figuur 10: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen voor gans Vlaanderen (linksboven) en per landbouwstreek; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



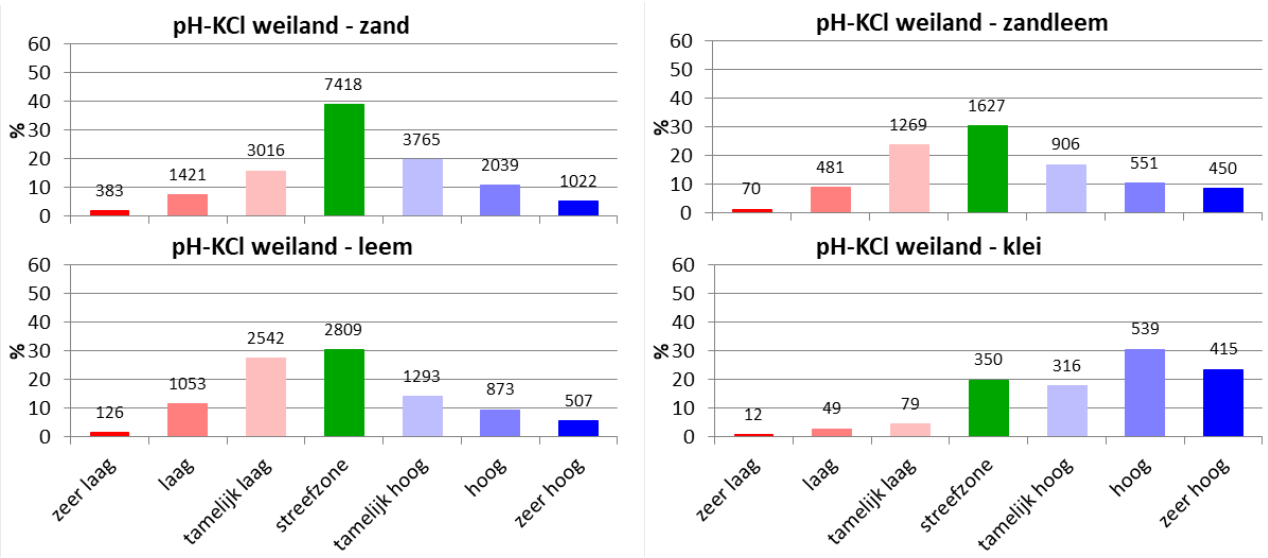
Figuur 11: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen per provincie; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



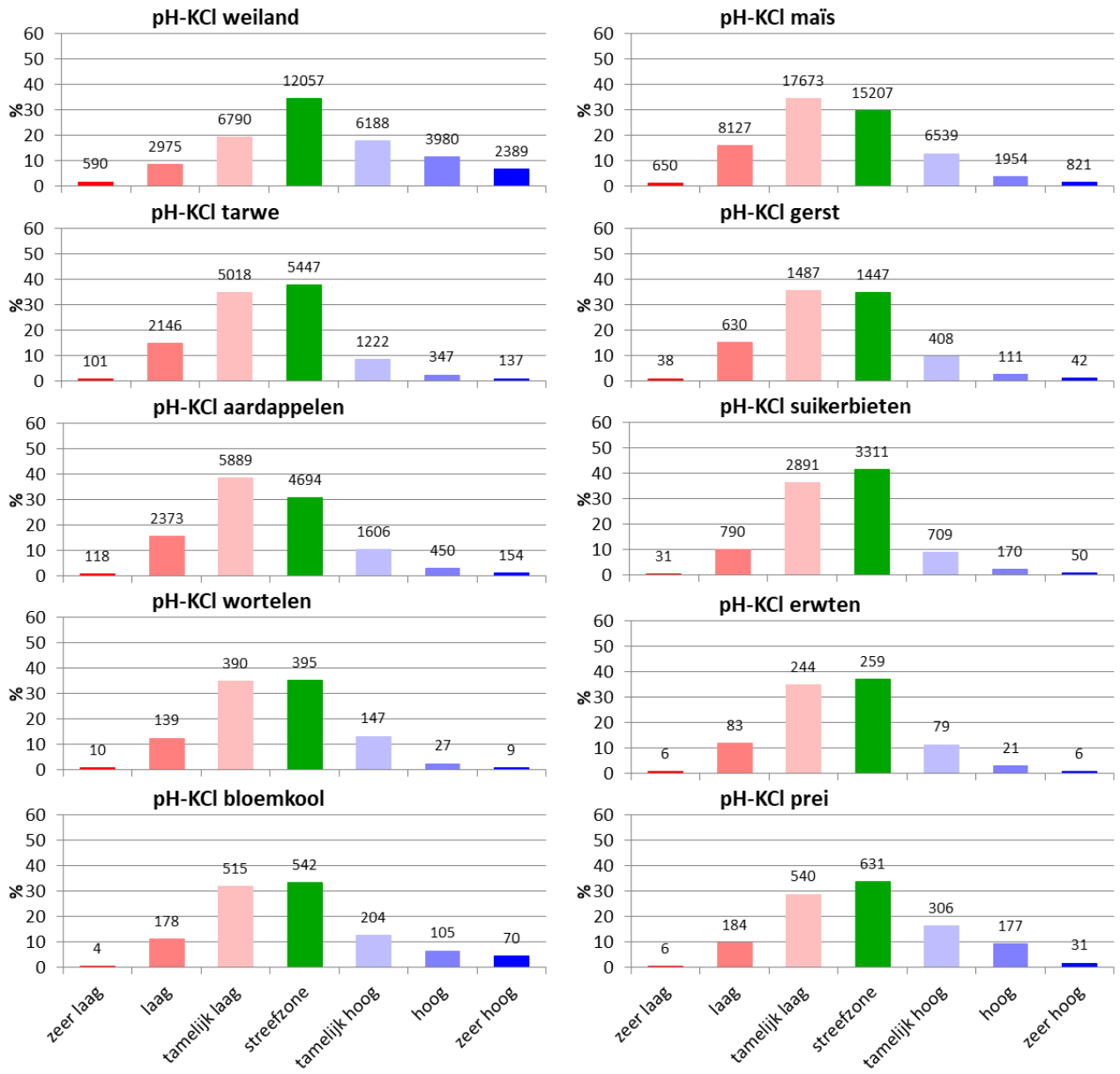
Figuur 12: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen per provincie; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



Figuur 13: Procentuele verdeling van de akkerstalen in 7 beoordelingsklassen per bodemtextuurklasse; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



Figuur 14: Procentuele verdeling van de weilandstalen in 7 beoordelingsklassen per bodemtextuurklasse; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)



Figuur 15: Procentuele verdeling van de bodemstalen in 7 beoordelingsklassen per teeltgroep, volgens de eerste teelt die volgt na de bodemstaalname; boven elk balkje wordt het aantal stalen weergegeven (databank BDB, 1/1/2015-31/12/2018)

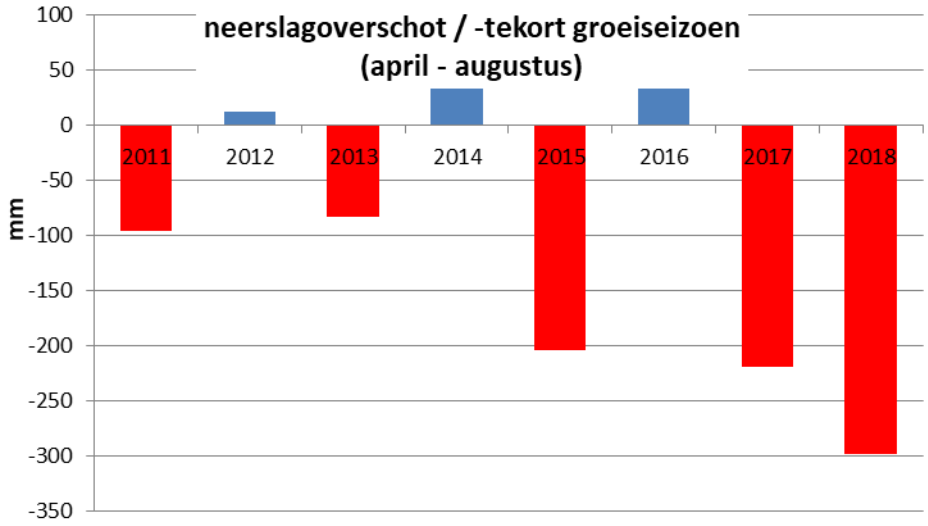
5.2.4 Nitraatresidu in Vlaanderen: historiek

Figuur 16: Evolutie van het gewogen gemiddelde nitraatresidu, volgens de initiële en geactualiseerde berekeningswijze, bij de staalnamecampagne van de Mestbank (VLM, Nitraatresidurapport 2017)

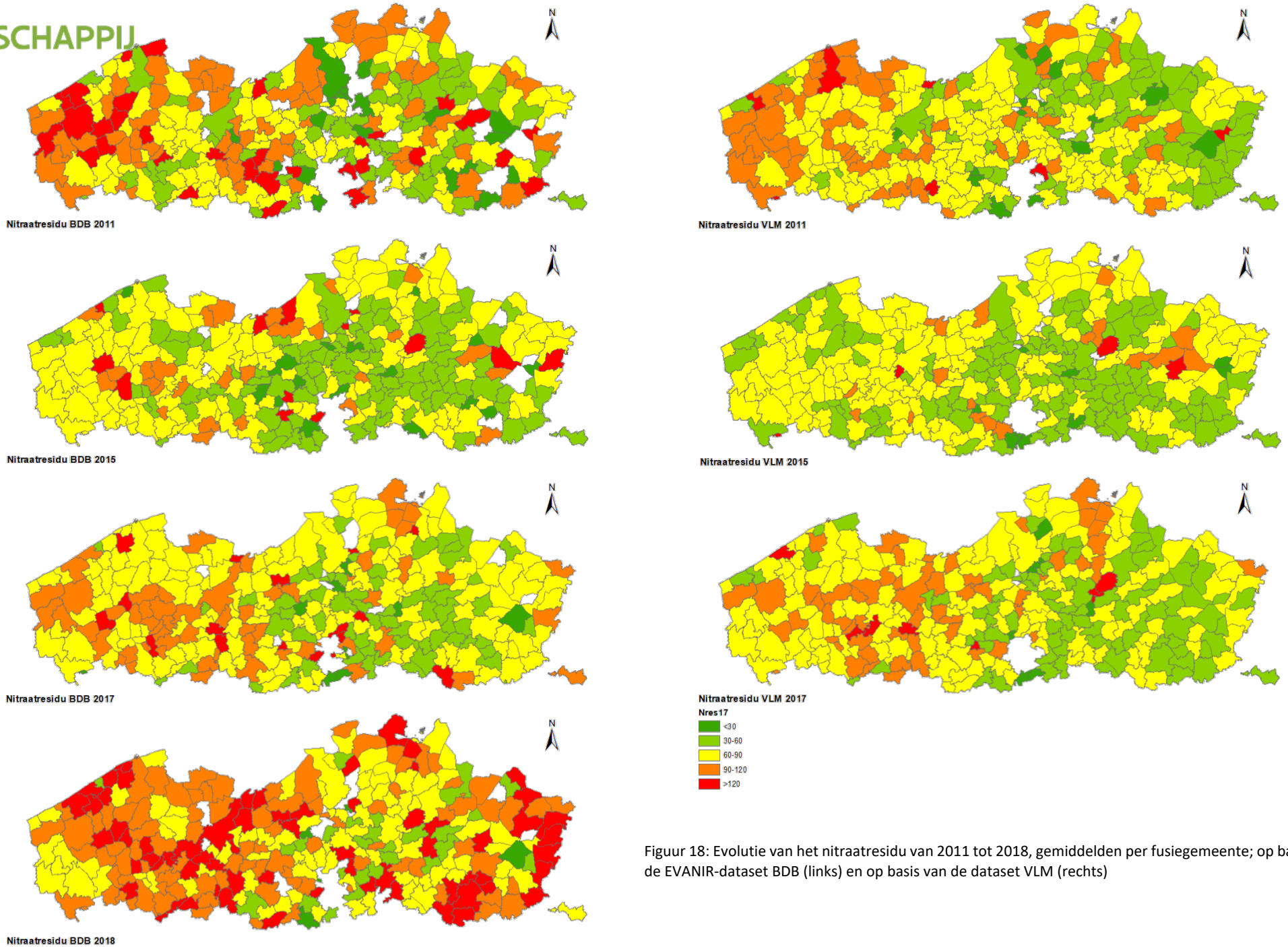
In Figuur 18 wordt de evolutie van het nitraatresidu van 2011 tot en met 2018 cartografisch weergegeven aan de hand van gemiddelden per fusiegemeente, op basis van de dataset van de Bodemkundige Dienst enerzijds en van de VLM-Mestbank anderzijds. De gegevens van de percelen met beheersovereenkomst Water zijn niet meegenomen in deze analyse.

Over het algemeen liggen de gemiddelde nitraatresidu's iets hoger in de BDB-dataset dan in de VLM-dataset. De reden hiervoor is niet duidelijk (hermetingen, meer stalen in bepaalde teelten en/of streken, …), maar de trends zijn wel dezelfde in beide sets. Dit is geen probleem voor de verdere verwerking van de data in het kader van deze studie.

In het algemeen lagen de nitraatresidu's in 2011 op het hoogste niveau. In 2012 werd een significante daling van de gemiddelde nitraatresidu's opgetekend, om in de daaropvolgende jaren geleidelijk opnieuw te stijgen tot in 2017 ongeveer hetzelfde niveau als in 2011 werd bereikt. In 2018 werd opnieuw een sterke stijging vastgesteld, tot boven het niveau van 2011. Deze verschillen zijn sterk gerelateerd aan de specifieke weersomstandigheden van de betreffende jaren, en meer bepaald met de neerslaghoeveelheid tijdens het groeiseizoen. (Te) droge jaren zorgen voor een sterk verminderde gewasgroei en dus ook een verminderde N-opname door het gewas, met hogere nitraatresidu's als gevolg. Zo valt uit resp. Figuur 17 en Figuur 19 af te leiden dat de jaren met de hoogste nitraatresidu's overeenkomen met de jaren waarin belangrijke neerslagtekorten tijdens het groeiseizoen werden opgetekend.

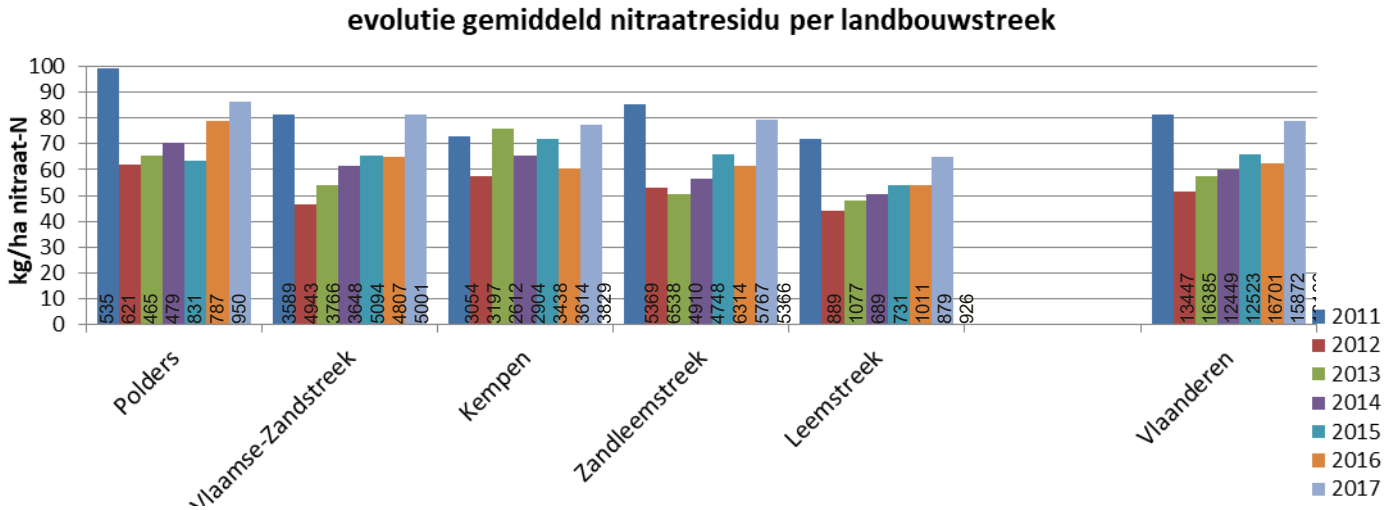


Figuur 17: Gemiddelde neerslagoverschot (blauw) of -tekort (rood) te Ukkel tijdens het groeiseizoen (april tot augustus) in de jaren 2011 t/m 2018 (bron: KMI)

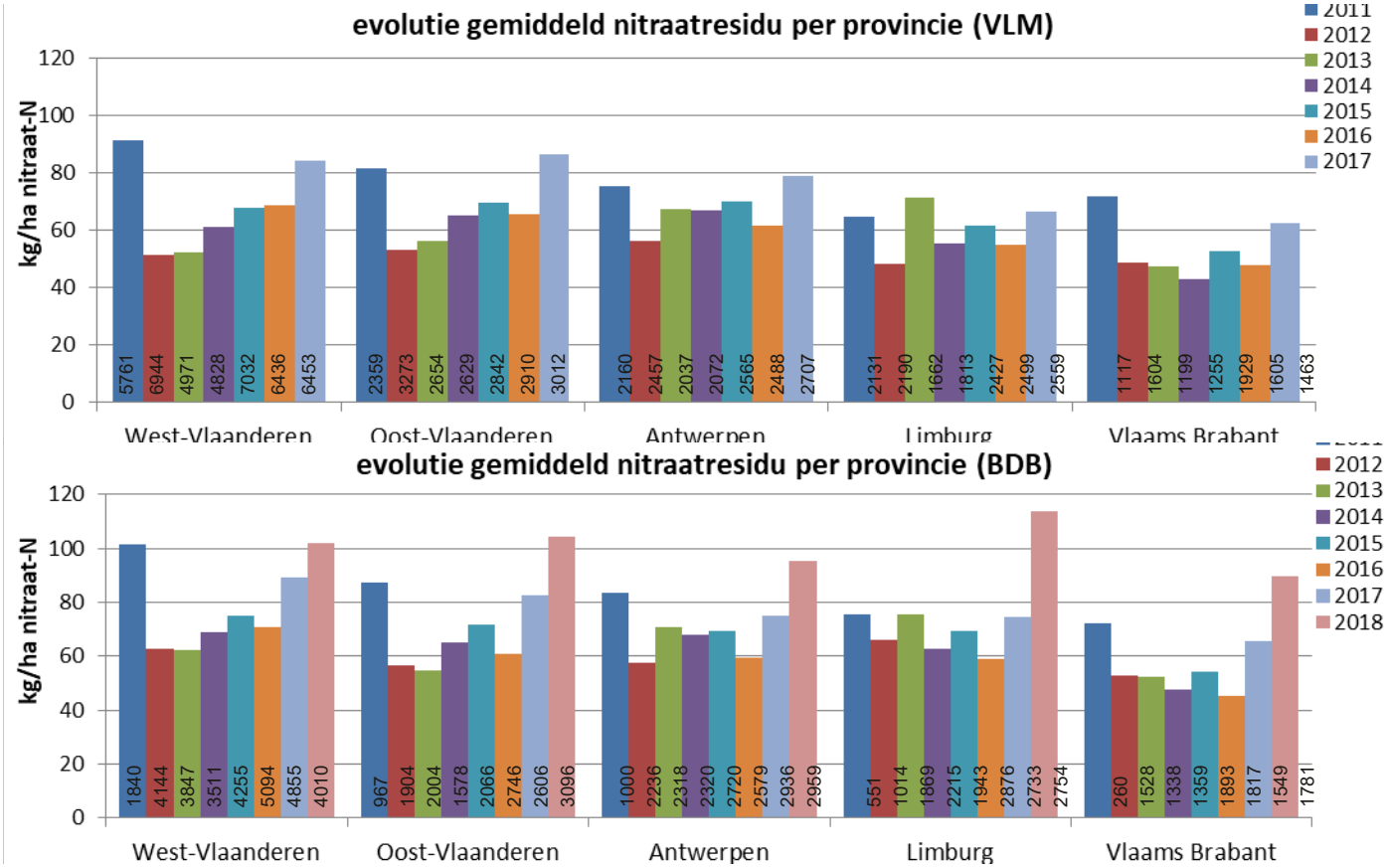


Figuur 18: Evolutie van het nitraatresidu van 2011 tot 2018, gemiddelden per fusiegemeente; op basis van de EVANIR-dataset BDB (links) en op basis van de dataset VLM (rechts)

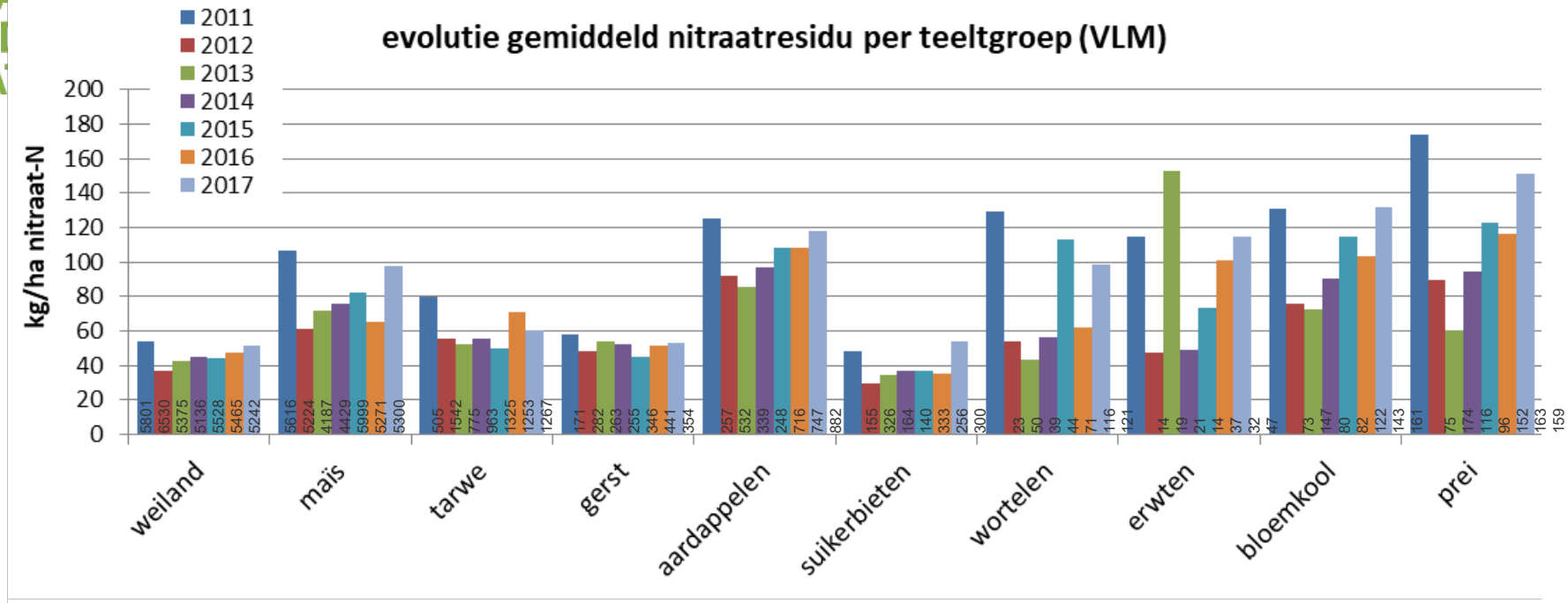
5.2.5 Nitraatresidu in Vlaanderen: huidige situatie

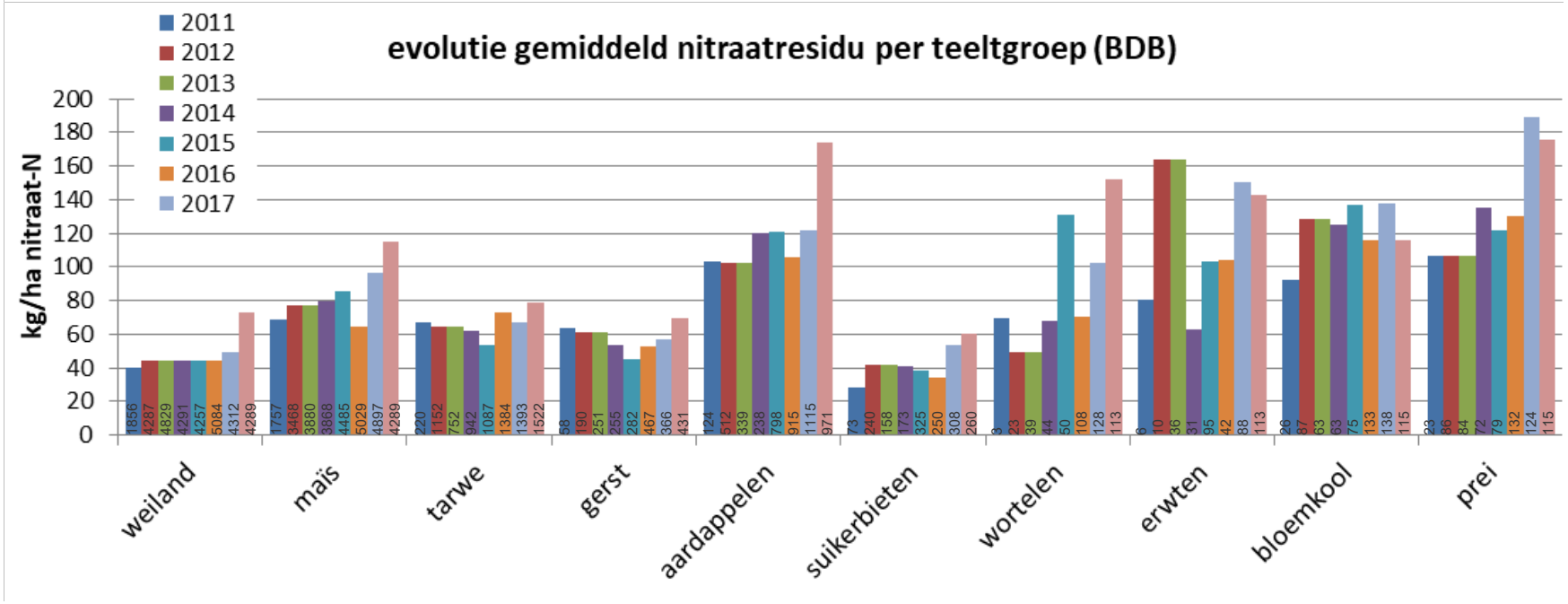


Figuur 19: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per landbouwstreek o.b.v. de dataset VLM; de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer



Figuur 20: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per provincie o.b.v. de dataset VLM (boven) en o.b.v. de dataset BDB (onder); de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer





Figuur 21: Evolutie gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep o.b.v. de dataset VLM (boven) en o.b.v. de dataset BDB (onder); de cijfers in de balkjes geven het aantal stalen weer

5.2.6 Output - leverbaarheden

L5: Analyseresultaten van de huidige situatie Vlaanderen:

- Cartografische voorstelling van bodem-pH en nitraatresidu: zie Figuur 7, Figuur 8, Figuur 18.
- Voorstelling in cijfers (tabellen) en grafieken op verschillende aggregatieniveaus: zie Figuur 9 tot Figuur 15 en Figuur 19 tot Figuur 21.

5.3 STAP 2: VERBAND TUSSEN BODEM-PH EN STIKSTOFEFFICIËNTIE

5.3.1 Aanpak en gebruikte data

Het onderzoek naar verbanden tussen bodem-pH en stikstofbemestingsadviezen werd uitgevoerd op basis van de N-INDEX-databank van de Bodemkundige Dienst van België.

Voor het onderzoek van de werkelijke stikstofefficiënte (gewas-N-opname) werd gebruik gemaakt van de in Onderdeel 1 opgestelde gewasresponscurves, aangevuld met data uit de historische bekalkingsproeven van de BDB.

5.3.2 Verband bodem-pH en N-bemestingsadviezen (verwachte stikstofefficiëntie)

Nutriëntefficiëntie is een maat om uit te drukken hoe goed planten de aanwezige nutriënten opnemen. Ze hangt enerzijds af van de plantbeschikbaarheid/opneembaarheid van de nutriënten in de bodem en anderzijds van de capaciteit van de planten om ze op te nemen. Op beide aspecten oefent de bodem-pH een belangrijke invloed uit.

In de expertsystemen van de BDB wordt de verwachte stikstofefficiëntie vertaald in aangepaste bemestingsadviezen. Om na te gaan wat het effect is van de bodem-pH op de verwachte stikstofefficiëntie, in functie van teeltgroep, bodemtextuurklasse en organische-stofgehalte, werd een statistische analyse (correlatie- en regressie-analyse) uitgevoerd van de gegevens in de N-INDEX-databank. Hieruit kon echter geen enkel eenduidig verband worden aangetoond. Dit is eigenlijk niet geheel onverwacht aangezien N-bemestingsadviezen, naast de gewasbehoefte, in eerste instantie afhangen van de gemeten minerale-N-hoeveelheid in het bodemprofiel bij staalname (vaak in het voorjaar) en in tweede instantie van het organische-stofgehalte en de bodemtextuur. De in de bodem aanwezige N in het voorjaar wordt voornamelijk bepaald door het nitraatresidu in het voorbije najaar en de weersomstandigheden gedurende de voorbije winter (mineralisatie en uitspoeling). De bodem-pH heeft hier weinig effect op. Het eventuele effect van de bodem-pH op de te verwachten N-levering uit organische stof in de bodem en op de gewasopname komt daardoor weinig tot uiting in de N-index-bemestingsadviezen.

5.3.3 Verband bodem-pH en gewasopname van stikstof (werkelijke stikstofefficiëntie)

De werkelijke stikstofefficiëntie kan afgeleid worden door de stikstofopname door het gewas te berekenen uit gewasanalyses en gewasopbrengsten.

Zoals reeds afgeleid uit de literatuurstudie in Onderdeel 1 van deze studie, bestaat er voor de meeste gewassen een duidelijk verband tussen bodem-pH en potentiële opbrengst (pH-opbrengstresponscurves). In Onderdeel 1 werden, op basis van literatuur, voor enkele teelten en bodemtextuurklassen reeds een aantal pH-opbrengstresponscurves opgesteld. Om deze verder aan te vullen, zodat voor de belangrijkste teeltgroepen in

Vlaanderen een curve per bodemtextuurklasse kon worden opgesteld, werd teruggegrepen naar de resultaten van de historische bekalkingsproeven van de BDB (1952-1969).

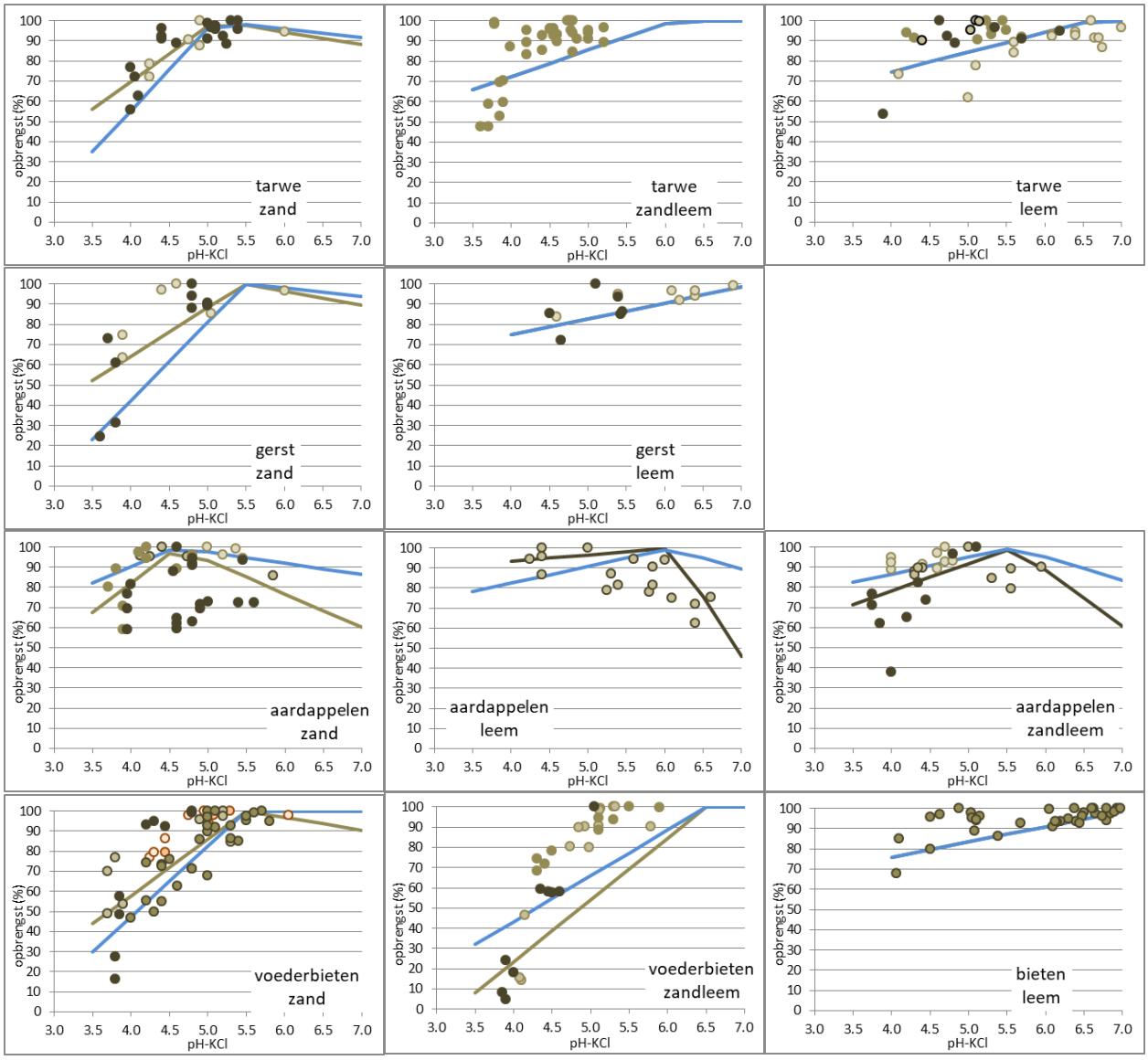
Voor de toepassing in het kader van de verdere theoretische berekeningen (5.6 en 6.2) werden de resultaten van de literatuurstudie en de historische bekalkingsproeven samengevoegd. Hieruit werden vervolgens sterk vereenvoudigde regressiecurves afgeleid, bestaande uit 3 cijfers voor elke teeltgroep en per bodemtextuurklasse: de optimale pH-KCl-waarde die overeenkomt met een relatieve opbrengst gelijk aan 100%, een regressiecoëfficiënt voor pH-waarden lager dan optimaal (rc-) en een regressiecoëfficiënt voor pH-waarden hoger dan optimaal (rc+) (Tabel 9). Ontbrekende cijfers/coëfficiënten voor teelgroep*bodemtextuurklasse-combinaties waarvoor noch in de literatuur noch in de historische proefvelden cijfers werden teruggevonden, werden aangevuld met gemiddelde waarden van andere, gelijkaardige teeltgroepen of van andere bodemtextuurklassen.

Tabel 9: Optimale pH en vereenvoudigde pH-opbrengstresponscurves voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse (o.b.v. Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Tabel 6, Bries & Moermans, 2015; Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973; Tumusiime et al., 2010; databank historische bekalkingsproeven BDB)

Teeltgroep	zand			zandleem			leem			klei/polder		
	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+	optimale pH	rc-	rc+
optimaal OC% akkerbouw	1,8-2,8%			1,2-1,6%			1,2-1,6%			1,6-2,6%		
Maïs	5,1	-23	-8	6,1	-13	0	6,6	-10	0	7,1	-7	0
Tarwe	5,1	-16	-4	6,1	-13	0	6,6	-10	0	6,8	-7	0
Gerst	5,5	-17	-4	6,5	-16	0	7,2	-8	0	7,6	-5	0
aardappelen	4,6	-16	-6	5,6	-14	-28	5,0	-3	-60	6,5	0	-10
suikerbieten	5,5	-35	0	6,5	-23	0	7,0	-8	0	7,6	-7	0
wortelen	5,5	-16	-4	6,5	-15	0	7,2	-9	0	7,6	-6	0
Erwten	5,5	-8	-2	6,5	-8	-2	7,2	-8	-2	6,0	-8	-2
bloemkool	5,5	-35	0	6,5	-23	0	7,2	-8	0	7,6	-7	0
prei	5,5	-16	-4	6,5	-15	0	7,2	-9	0	7,6	-6	0
optimaal OC% grasland	3,6-5,5%			3,6-5,5%			2,6-4,2%			3,6-5,5%		
grasland	5,3	-5	0	5,9	-5	0	5,9	-5	0	6,0	-5	0

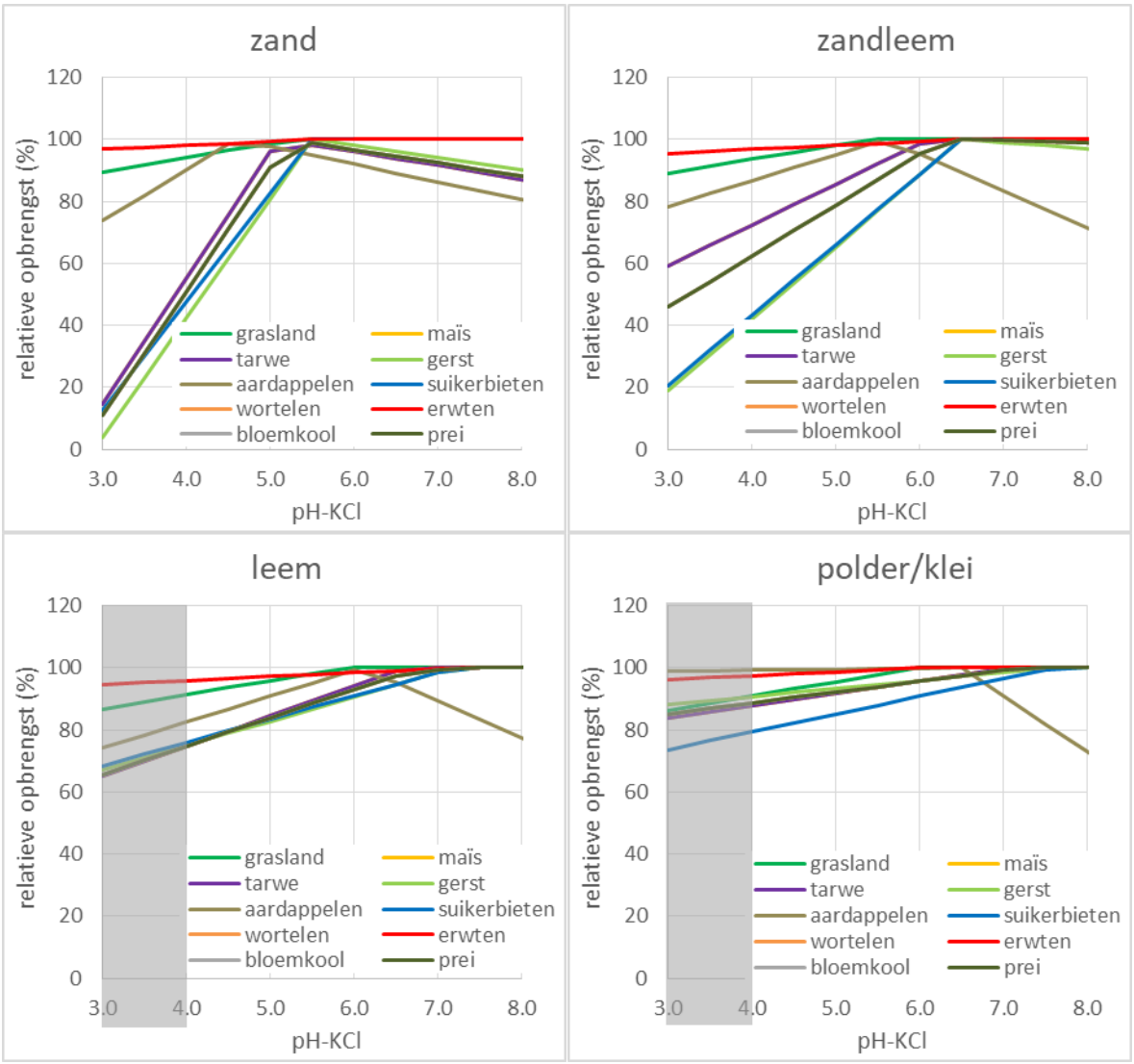
rc- = regressiecoëfficiënt bij pH < optimaal
rc+ = regressiecoëfficiënt bij pH > optimaal

In Figuur 22 worden de resultaten van de historische bekalkingsproeven van de BDB voor enkele teelten * bodemtextuurklassen uitgezet t.o.v. de in Tabel 9 opgestelde vereenvoudigde pH-responscurves. De bruine punten en lijnen geven de resultaten van de proefvelden weer; de blauwe lijnen komen overeen met de opgestelde responscurves in Tabel 9. Hoewel in het kader van deze beperkte studie expliciet gekozen werd voor lineaire curves omwille van de eenvoudigheid van de berekeningen, vertoont een aantal van deze figuren duidelijk een mitscherlich of kwadratisch verloop. De curves geven aan dat de inschatting van het effect van een te lage pH door de lineaire curves in sommige gevallen overschat kan worden, vooral bij een pH net onder de streefzone; dit kan een rol spelen bij de berekening van opbrengstdervingen (zie 6.2).



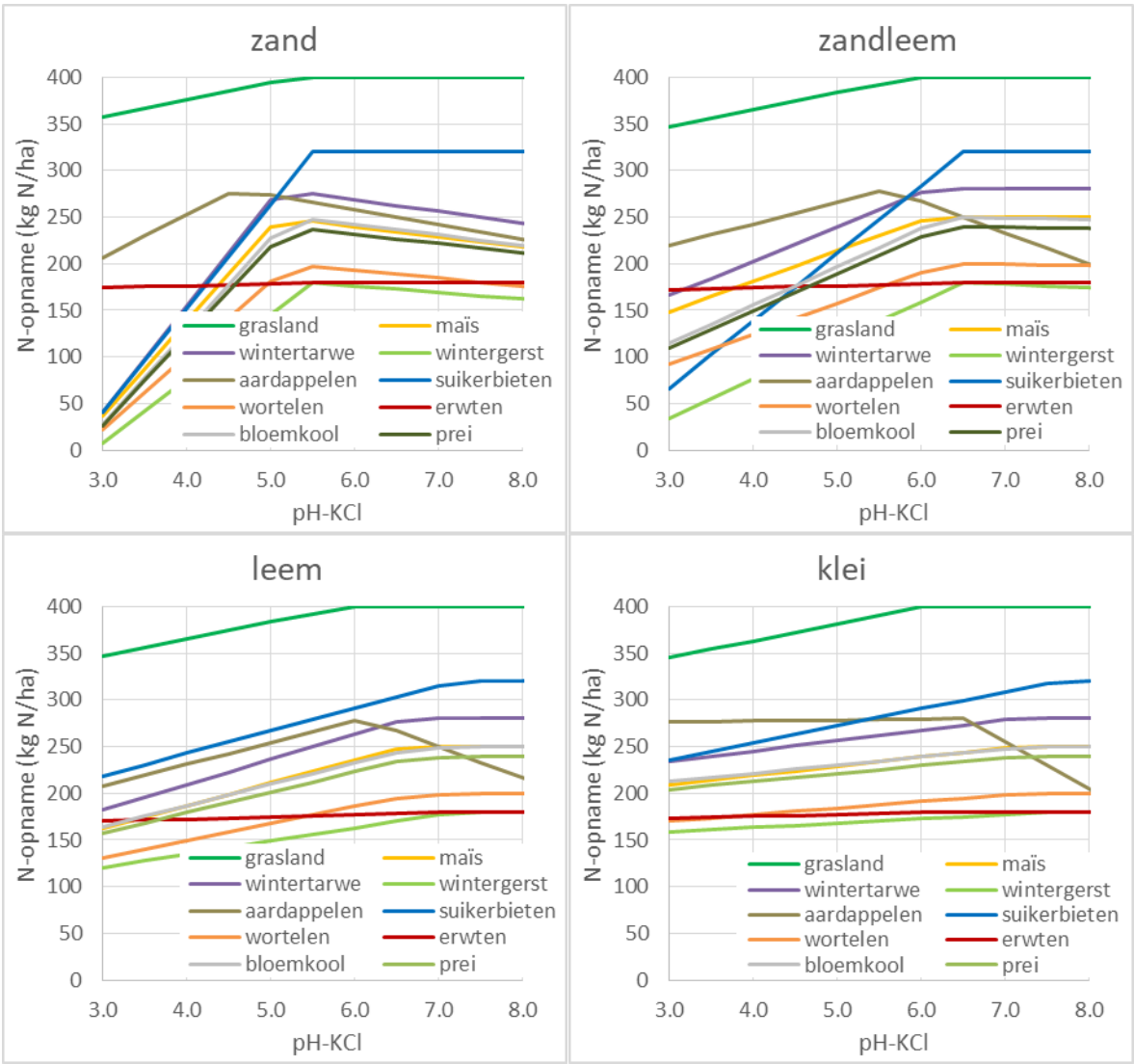
Figuur 22: Relatieve opbrengst i.f.v. pH-KCl voor enkele teelten, cijfers van de historische bekalkingsproeven van de BDB (bruine punten en lijnen) uitgezet t.o.v. de in Tabel 9 opgestelde vereenvoudigde responscurves (blauwe lijnen)

In Figuur 23 worden de pH-opbrengstresponscurves van Tabel 9 zoals ze in de verdere theoretische berekeningen zullen gebruikt worden grafisch voorgesteld voor de 10 teeltgroepen * 4 bodemtextuurklassen.



Figuur 23: pH-opbrengstresponscurves voor de 10 teelt(groep)en, per bodemtextuurklasse
De curves voor bloemkool, wortelen en prei komen overeen met deze van suikerbieten, de curves voor maïs komen overeen met deze van tarwe; in leem- en kleigronden komen pH-KCl-waarden kleiner dan 4 nagenoeg niet voor.
(o.b.v. Dillen & Deckers, 2016; Deckers & Bries, 2013; Tabel 6, Bries & Moermans, 2015; Boksma, 1967; Loman&Bakker, 1973; Tumusiime et al., 2010; databank historische bekalkingsproeven BDB)

Door de opbrengstresponscurves te vermenigvuldigen met de gemiddelde N-opname door het gewas bij een normale (gemiddelde) opbrengst (Tabel 6) werden stikstofopnameresponscurves in functie van de pH-KCl opgesteld (Figuur 32).



Figuur 24: Gemiddelde N-opname i.f.v. de pH-beoordelingsklasse voor de belangrijkste teelt(groep)en in Vlaanderen, per bodemtextuurklasse en bij een optimaal organische-stofgehalte

5.3.4 Output - leverbaarheden

L6: Tabellen met gemiddelde stikstofbemestingsadviezen i.f.v. pH, gedifferentieerd volgens teelt(groep), bodemtype en OC-klasse, op basis van de N-INDEX-databank: niet van toepassing aangezien geen eenduidige verbanden konden vastgesteld worden.

L7: Tabellen met gewasopname van stikstof i.f.v. de bodem-pH voor de belangrijkste teelten → zie Figuur 24.

5.4 STAP 3: STATISTISCH VERBAND TUSSEN BODEM-PH EN NITRAATRESIDU O.B.V. BODEMANALYSERESULTATEN

5.4.1 Aanpak

Statistische verbanden tussen bodem-pH en nitraatresidu werden berekend uit (een deel van) de EVANIR-databank, waar we, naast de reststikstofmetingen, ook over pH-, textuur- en organische-koolstofgegevens beschikken. Zoals al vermeld in Stap 1 werd hierbij het jaareffect (combinatie van klimaateffecten en geldende bemestingsnormen) in rekening gebracht en werden de verbanden verder gedifferentieerd naar teelt(groep) (weiland, maïs, tarwe, gerst, aardappelen, suikerbieten) en bodemtextuurklasse (zand, zandleem, leem, klei).

De statistische verwerking gebeurde met het programma Statistica 8.0 (Statsoft Inc. , 1984-2007).

Stappen:

1. Verkennende analyse: correlatie-analyse pH-nitraatresidu
2. Voorwaarden voor parametrische statistiek: normaalverdeling en log-transformatie nitraatresidu's
3. Kaderen nitraatresidu-niveau's binnen pH-streefzone en -beoordelingsklassen: ANOVA
4. Bepalen coëfficiënten voor schatting effect pH-optimalisatie op nitraatresidu: lineaire regressies met al dan niet gestandaardiseerde nitraatresidu-waarden
5. Voorspellend model voor schatting effect pH-optimalisatie op nitraatersidu: mixed model nitraatresidu i.f.v. jaar, teeltgroep, bodemtextuurklasse (categorische predictoren) en pH (continue predictor)

5.4.2 Gebruikte data

De gebruikte dataset voor deze analyses is een sub-set van de EVANIR-databank van BDB met in totaal 18643 analyseresultaten tussen 2011 en 2014 waarbij op hetzelfde bodemstaal zowel het nitraatresidu als de pH-KCl-gemeten werd. De gegevens van de percelen met beheersovereenkomst Water werden niet meegenomen in deze analyse.

In Tabel 10 worden de aantallen stalen per combinatie (jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse) weergegeven.

Tabel 10: Aantal stalen waarop zowel het nitraatresidu als de pH-KCl gemeten werd (bron EVANIR-databank BDB)

	zand	zandleem	leem	klei
weiland				
2011	1007	284	448	116
2012	1267	380	667	179
2013	1054	311	433	167
2014	1180	353	389	141
maïs				
2011	897	300	520	40
2012	1130	337	695	32
2013	931	238	471	43
2014	1074	231	337	15
tarwe				
2011	18	24	133	45
2012	48	42	495	57
2013	25	20	194	24
2014	22	25	188	27
gerst				
2011	8	7	40	3
2012	9	4	67	9
2013	9	4	93	2
2014	18	9	39	4
aardappelen				
2011	17	37	66	4
2012	44	35	185	0
2013	29	19	75	4
2014	31	22	63	3
suikerbieten				
2011	1	2	51	19
2012	4	5	103	6
2013	7	7	53	9
2014	24	8	35	11
wortelen				
2011	0	1	2	0
2012	1	4	4	0
2013	3	9	7	0
2014	3	3	4	0
erwten				
2011	0	1	4	1
2012	0	1	3	0
2013	5	1	4	0
2014	0	1	6	0
bloemkool				
2011	4	9	13	0
2012	0	17	18	2
2013	1	3	6	0
2014	3	10	7	0

prei				
2011	6	12	5	0
2012	8	11	23	0
2013	4	7	16	1
2014	4	14	13	0

5.4.3 Data-screening: correlatie-analyse

Voor de categorieën (jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse) waarvoor voldoende metingen beschikbaar waren werd de correlatie tussen nitraatresidu en pH-KCl berekend (Tabel 11).

Een positieve correlatie betekent dat hogere nitraatresidu's worden gemeten bij hogere pH-waarden; bij een negatieve correlatie worden hogere nitraatresidu's gemeten bij lagere pH-waarden.

Uit de correlatie-analyse werd het volgende vastgesteld:

- weilanden in zandleembodems vertonen in 3 van de 4 jaren een significant positieve correlatie (0,13-0,17, gemiddeld 0,15),
- weilanden in kleibodems vertonen in 1 jaar een significant negatieve correlatie (-0.21),
- maïsvelden vertonen meestal een negatieve correlatie, die significant is in zandgronden en in 1 jaar ook in zandleemgronden,
- suikerbieten in kleibodems vertonen in 2 van de 4 jaren een significant negatieve correlatie,
- voor tarwe en aardappelen zijn de correlaties nooit significant.

Voor de andere teelten zijn er te weinig data beschikbaar om correlaties te kunnen doorrekenen.

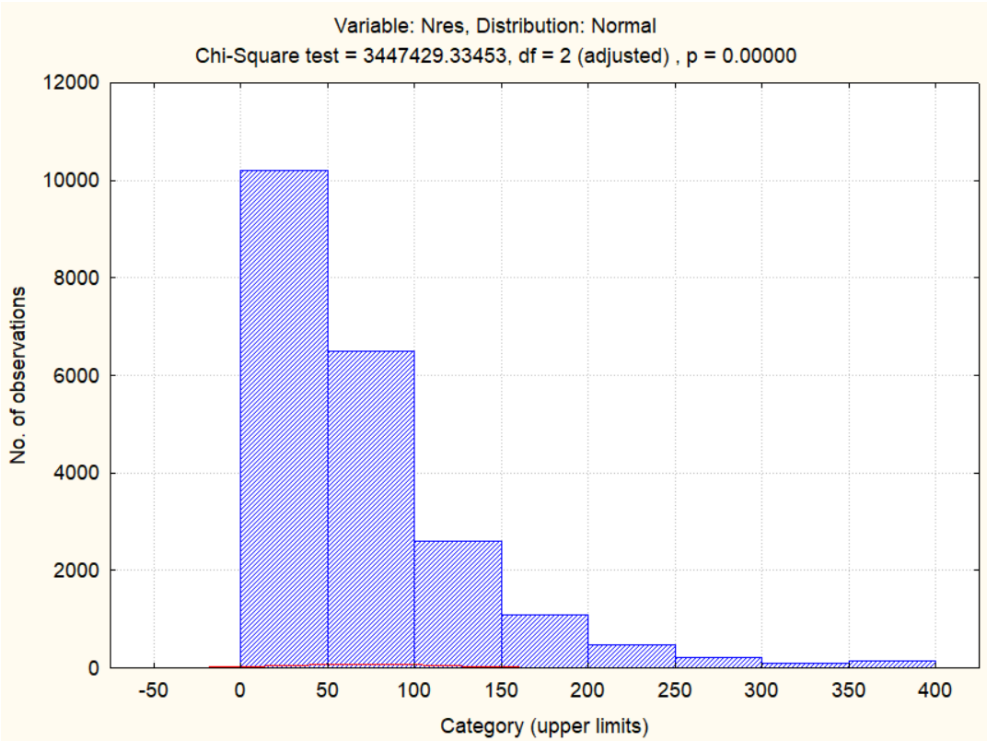
Tabel 11: Pearson Correlatiecoëfficiënten nitraatresidu*pH-KCl, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse; rechts: enkel percelen met pH-klasse <= 4; aantal stalen tussen haakjes; significante correlaties (p<0.05) zijn in het rood aangeduid (bron EVANIR-databank BDB)

	zand	zandleem	leem	klei	zand	zandleem	leem	klei
weiland								
2011	0.02	0.14	0.09	-0.03	-0.01 (818)	0.16 (191)	0.05 (328)	0.33 (32)
2012	0.01	0.17	0.04	-0.13	-0.04 (1033)	0.00 (298)	0.01 (530)	-0.03 (64)
2013	0.01	0.00	0.04	-0.03	0.00 (888)	-0.12 (237)	0.04 (327)	0.04 (60)
2014	0.04	0.13	-0.03	-0.21	0.03 (983)	0.04 (263)	0.04 (312)	-0.04 (41)
maïs								
2011	-0.07	0.01	0.07	-0.26	-0.07 (716)	-0.08 (241)	0.02 (486)	-0.21 (37)
2012	-0.08	-0.09	-0.01	0.18	-0.06 (950)	-0.08 (302)	-0.04 (668)	0.18 (32)
2013	-0.17	-0.27	-0.05	-0.13	-0.10 (777)	-0.29 (194)	-0.10 (456)	-0.10 (42)
2014	-0.12	-0.08	-0.04	-0.01	-0.11 (922)	-0.08 (188)	-0.00 (317)	-0.01 (15)
tarwe								
2011	0.07	0.17	-0.14	-0.02	0.13 (13)	0.52 (14)	-0.16 (121)	-0.02 (45)
2012	-0.23	0.17	-0.01	-0.13	0.02 (32)	-0.09 (33)	-0.03 (484)	-0.13 (57)
2013	-0.21	0.06	0.06	-0.13	-0.04 (19)	0.26 (17)	-0.01 (182)	-0.13 (24)
2014	0.03	-0.32	-0.01	0.00	0.24 (18)	-0.30 (21)	-0.01 (176)	-0.06 (25)
gerst								
2011					0.59 (8)	0.45 (7)	0.10 (39)	
2012					-0.57 (6)		-0.38 (64)	0.21 (9)
2013					0.62 (8)	-0.62 (3)	-0.12 (89)	
2014					0.37 (16)	-0.06 (5)	0.12 (38)	-0.69 (4)

aardappelen								
2011	-0.22	-0.16	0.03	0.70	-0.31 (11)	-0.22 (31)	0.01 (61)	0.82 (3)
2012	-0.09	0.08	0.08		-0.22 (35)	0.32 (29)	0.12 (182)	
2013	0.13	0.21	-0.04	0.27	-0.28 (27)	0.23 (18)	0.03 (71)	0.74 (3)
2014	0.14	-0.19	-0.04	0.72	-0.19 (26)	-0.00 (15)	-0.02 (62)	0.72 (3)
suikerbieten								
2011			0.13	-0.75			-0.06 (44)	-0.75 (19)
2012	0.67	0.30	0.12	-0.12	0.45 (3)	0.30 (5)	0.10 (100)	-0.12 (6)
2013	-0.18	0.74	0.08	-0.87	-0.18 (7)	0.48 (6)	-0.05 (52)	-0.87 (9)
2014	-0.21	-0.32	0.09	0.02	-0.82 (11)	-0.05 (6)	0.11 (34)	0.02 (11)

5.4.4 Normaalverdeling en log-transformatie

Voorafgaand aan de verdere statistische analyse (regressie, covariantie) werden de nitraatresidugegevens getest voor normaalverdeling. Zoals reeds in eerder onderzoek werd vastgesteld (o.a. Van Overtveld et al., 2011; Odeurs et al., 2019), bleken de nitraatresidu-gegevens niet normaal verdeeld te zijn (zie Figuur 25).



Figuur 25: Distributie nitraatresidu: alle cijfers (2011-2014)

Om variantie- en regressieanalyses te kunnen uitvoeren werden de nitraatresidu-gegevens eerst getransformeerd. Hiervoor werd de natuurlijke logaritme toegepast:

Nres_t=log(Nres+1)

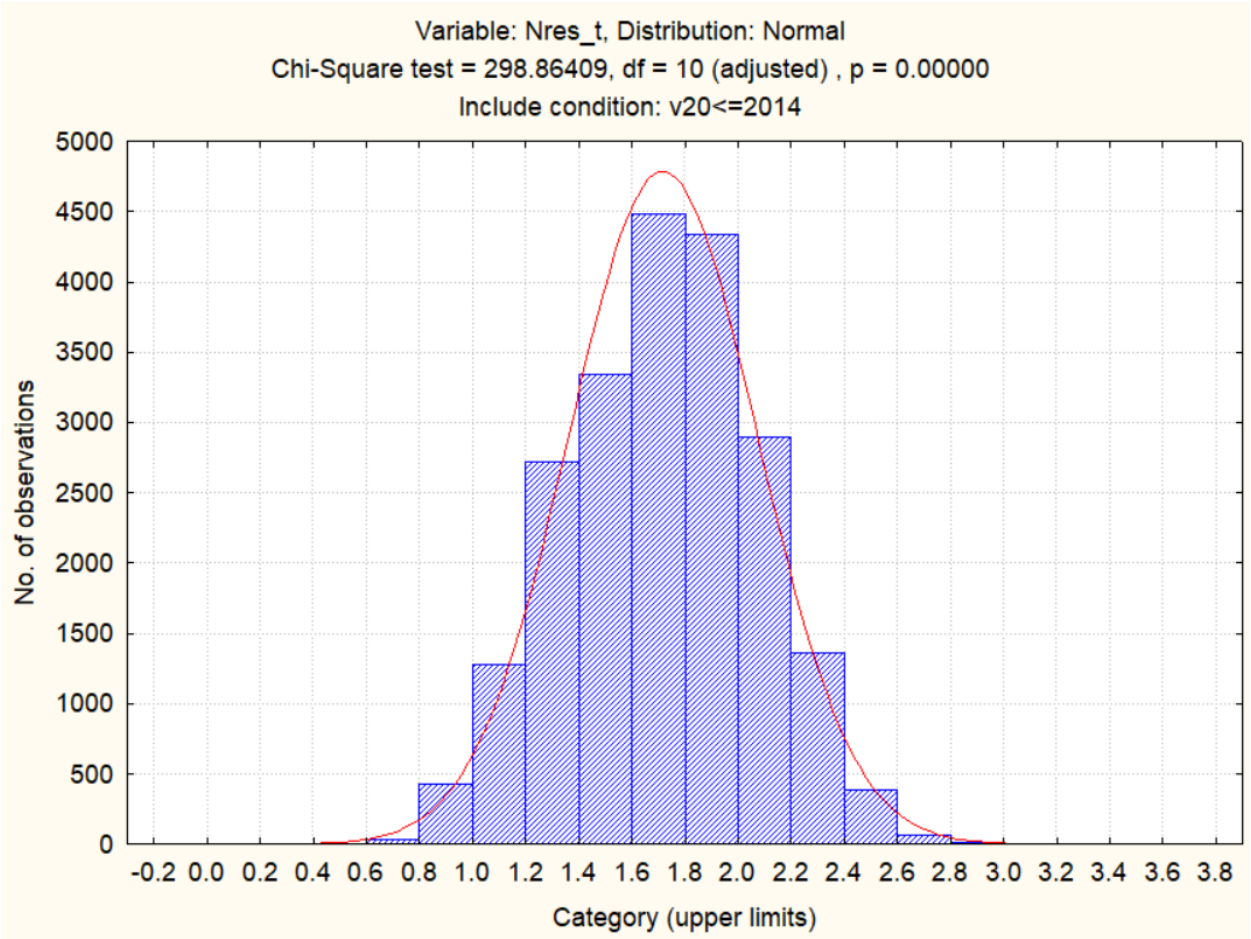
waarbij

Nres = nitraatresidu en

Nres_t = getransformeerd nitraatresidu.

Het nitraatresidu werd vermeerderd met 1 om negatieve cijfers bij de log-transformatie te vermijden.

Na de log-transformatie is de verdeling quasi-normaal (Figuur 26). Hierdoor voldoet de steekproefpopulatie aan de voorwaarden om met parametrische statistische tests (regressie, AN(C)OVA) geanalyseerd te worden.



Figuur 26: Distributie log-getransformeerd nitraatresidu (2011-2014)

Ook al worden de statistische analyses uitgevoerd op getransformeerde variabelen, voor de scenarioberekening in stap 5 moeten de bekomen statistische modellen doorgerekend worden met de nieuwe, geoptimaliseerde pH-waarden en moeten deze resultaten uitgedrukt worden in de oorspronkelijke eenheden. Hiervoor moet dan een terugtransformatie toegepast worden:

Nres_b=10^(Nres_t) – 1

waarbij

Nres_b = teruggetransformeerd nitraatresidu en

Nres_t = getransformeerd nitraatresidu.

5.4.5 Variantie-analyse pH-klassen

Om de nitraatresidu-niveau's te kaderen in de pH-beoordelingsklassen werd een variantie-analyse (one-way ANOVA) uitgevoerd met als afhankelijk variabele het getransformeerde nitraatresidu (Nres_t) en als voorspellende variabele de pH-klasse (van 1 tot 7).

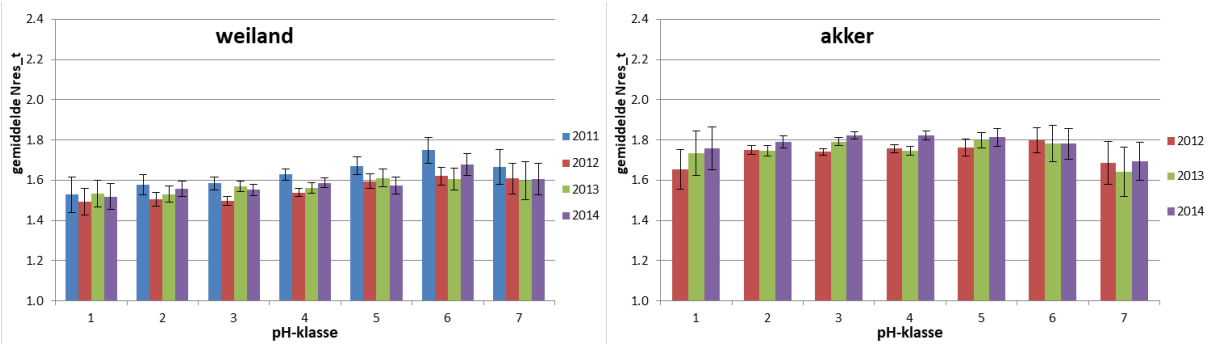
Eerst werden alle data per jaar verwerkt voor weilanden en akkerpercelen apart. Vervolgens werd ook een analyse gemaakt per jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse (indien voldoende gegevens per categorie).

In Tabel 12 worden de resultaten van deze variantieanalyses (p- en R^2-waarden) gegeven. In Figuur 28 worden, voor de categorieën (teeltgroep*bodemtextuurklasse*jaar) waarvoor een significant effect van pH-beoordelingsklasse op het nitraatresidu werd berekend, de gemiddelde getransformeerde nitraatresidu's (Nres_t) i.f.v. de pH-beoordelingsklasse weergegeven, samen met de 95% betrouwbaarheidsintervallen rond de gemiddelden.

Tabel 12: Variantieanalyse van het nitraatresidu i.f.v. de pH-klasse, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse; significante verbanden (p<0.1) zijn in het rood aangeduid

Jaar	Teeltgroep	Textuurklasse	aantal	ANOVA nitraatresidu ifv pH-klasse Whole Model	
				p	R^2adj
2011	weiland	alle	1851	0.6395	0.000
2012	weiland	alle	2487	0.0239	0.030
2013	weiland	alle	1958	0.1197	0.023
2014	weiland	alle	2058	0.1578	0.030
2011	akker	alle	2488	0.2616	0.002
2012	akker	alle	3831	0.4621	-0.001
2013	akker	alle	2749	0.0162	0.018
2014	akker	alle	2842	0.7505	-0.048
2011	weiland	zand	1002	0.8232	-0.142
2011	weiland	zandleem	279	0.3234	0.007
2011	weiland	leem	443	0.6168	-0.024
2011	weiland	klei	111	0.6062	-0.033
2012	weiland	zand	1262	0.6855	-0.042
2012	weiland	zandleem	380	0.6829	-0.048
2012	weiland	leem	662	0.2888	0.002
2012	weiland	klei	173	0.0026	0.190
2013	weiland	zand	1047	0.5501	-0.036
2013	weiland	zandleem	306	0.0873	0.273
2013	weiland	leem	428	0.0423	0.031
2013	weiland	klei	162	0.0425	0.189
2014	weiland	zand	1175	0.0889	0.184
2014	weiland	zandleem	346	0.6123	-0.008
2014	weiland	leem	384	0.8986	-0.074
2014	weiland	klei	136	0.2160	0.053
2011	maïs	zand	891	0.4995	-0.016
2011	maïs	zandleem	295	0.8190	-0.045
2011	maïs	leem	515	0.0810	0.077
2011	maïs	klei	38	0.1058	0.004
2012	maïs	zand	1125	0.0319	0.088
2012	maïs	zandleem	332	0.9512	-0.100
2012	maïs	leem	691	0.6287	-0.046

2012	maïs	klei	31	0.0298	0.040
2013	maïs	zand	926	0.8833	-0.037
2013	maïs	zandleem	233	0.1728	0.096
2013	maïs	leem	468	0.0085	0.139
2013	maïs	klei	40	0.0997	0.076
2014	maïs	zand	1069	0.6963	-0.063
2014	maïs	zandleem	226	0.4160	0.007
2014	maïs	leem	333	0.6896	-0.029
2011	tarwe	zandleem	20	0.0000	0.062
2011	tarwe	leem	129	0.0486	0.010
2011	tarwe	klei	44	0.0088	0.063
2012	tarwe	zand	44	0.0656	0.042
2012	tarwe	zandleem	38	0.5422	-0.001
2012	tarwe	leem	491	0.3353	0.003
2012	tarwe	klei	55	0.2533	0.004
2013	tarwe	zand	23	0.0227	0.007
2013	tarwe	zandleem	16	0.1704	0.009
2013	tarwe	leem	194	0.3235	0.003
2013	tarwe	klei	23	0.0848	0.037
2014	tarwe	zand	19	0.3098	0.072
2014	tarwe	zandleem	22	0.3456	0.019
2014	tarwe	leem	184	0.6395	0.000
2014	tarwe	klei	26	0.0239	0.030
2011	gerst	leem	37	0.0029	0.012
2012	gerst	leem	65	0.0026	0.084
2013	gerst	leem	89	0.0000	0.024
2014	gerst	leem	36	0.1197	0.023
2011	aardappelen	zandleem	34	0.1367	0.011
2011	aardappelen	leem	62	0.2984	0.002
2012	aardappelen	zand	40	0.0000	0.032
2012	aardappelen	zandleem	31	0.0597	0.026
2012	aardappelen	leem	181	0.0128	0.018
2013	aardappelen	zand	26	0.0104	0.046
2013	aardappelen	leem	71	0.0508	0.018
2014	aardappelen	zand	28	0.1578	0.030
2014	aardappelen	zandleem	19	0.2616	0.002
2014	aardappelen	leem	60	0.4621	-0.001
2011	suikerbieten	leem	49	0.5466	-0.025
2012	suikerbieten	leem	101	0.7384	-0.050
2013	suikerbieten	leem	50	0.6909	-0.090
2014	suikerbieten	zand	19	0.0162	0.018
2014	suikerbieten	leem	32	0.7505	-0.048



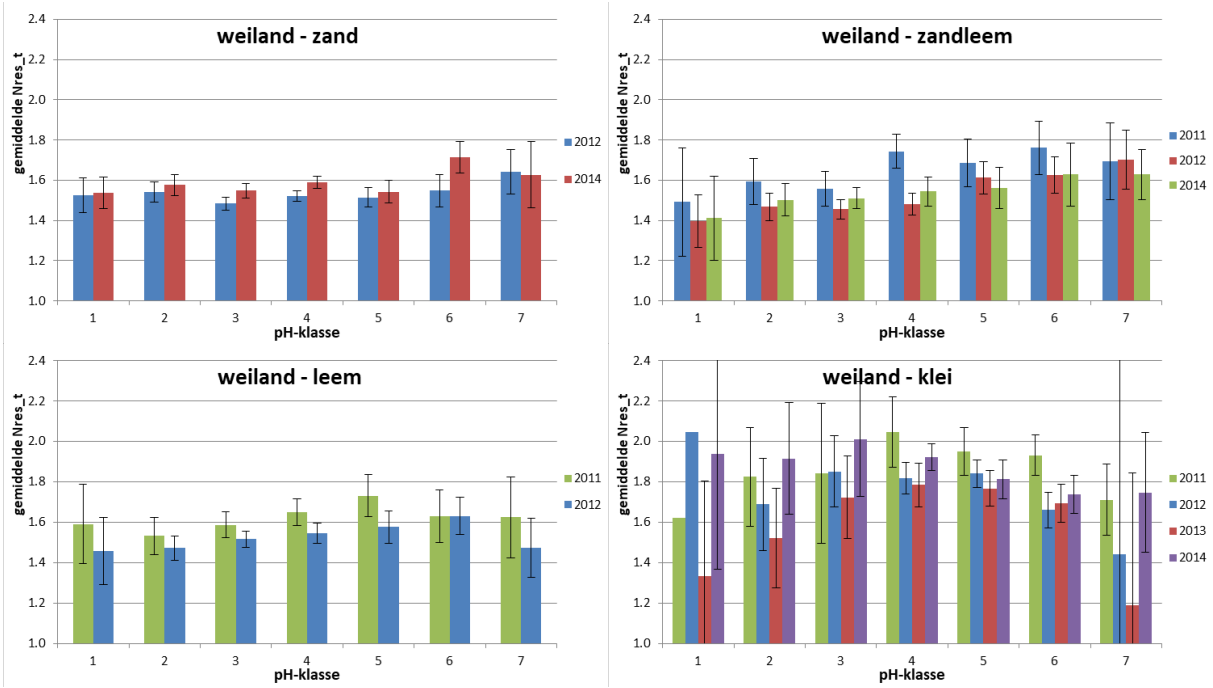
Figuur 27: Gemiddelde nitraatresidu's i.f.v. pH-beoordelingsklasse voor weiland- (links) en akkerpercelen (rechts; verticale lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval weer per jaar

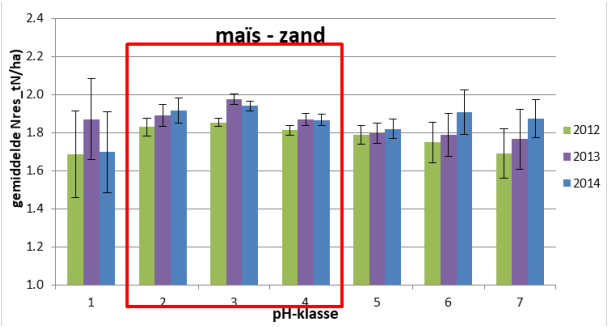
Voor weilanden liggen de pH-waarden algemeen hoger dan voor akkers, met beduidend meer percelen in de streefzone (klasse 4) en zelfs hoger (zie 5.2.3). Er is een trend zichtbaar naar hogere nitraatresidu's bij hogere pH-klassen, vooral voor klasse 6 en 7.

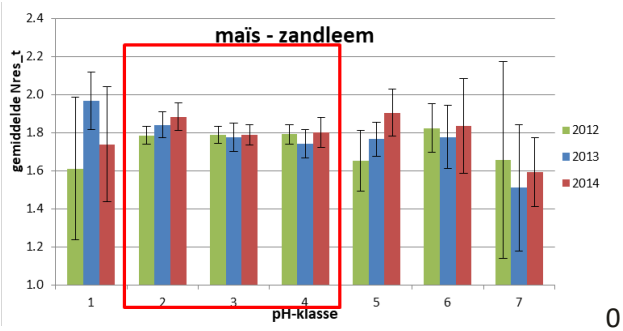
Voor akkers is het percentage percelen met (te) lage pH beduidend hoger. De meest voorkomende pH-klassen zijn hier klasse 2, 3 en 4 (zie 5.2.3). Aangezien we met deze studie uiteindelijk willen nagaan of de verbetering van de bodem-pH door bekalking een gunstig effect kan hebben op het nitraatresidu en de nitraatuitspoeling tijdens de winter, zijn we hier vooral geïnteresseerd in deze drie pH-klassen.

Uit de analyse per combinatie van jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse werden de volgende effecten afgeleid:

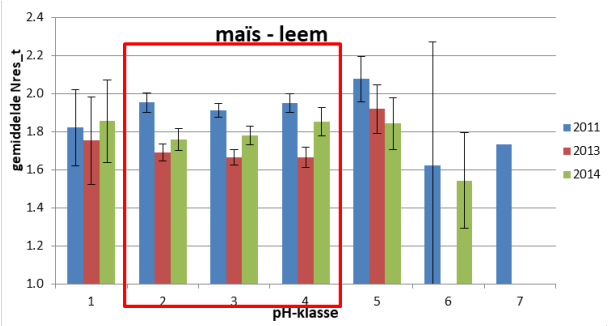
- Voor weilanden: geen eenduidig verband tussen pH-klasse en nitraatresidu; neiging tot hogere nitraatresidu's in de hogere pH-klassen, behalve voor de kleigronden; voor deze laatste combinatie zijn echter te weinig gegevens beschikbaar om duidelijke besluiten te trekken (zeer hoge variatie in de gegevens).
- In akkerpercelen worden hier en daar significante effecten van pH-klasse op nitraatresidu vastgesteld: voor maïs in 2011 op leemgronden, in 2012 op zand- en kleigronden en in 2013 op leem- en kleigronden; voor tarwe in 2011 op zandleem-, leem en kleigronden, in 2013 op zand- en kleigronden en in 2014 op kleigronden; voor gerst in 2011, 2012 en 2013 op leemgronden; voor aardappelen in 2012 op zand-, zandleem- en leemgronden en in 2013 op zand- en leemgronden; voor suikerbieten in 2014 op zandgronden. Hoewel de verschillen tussen de klassen zelf vaak niet significant zijn is er een algemene trend zichtbaar naar iets lagere nitraatresidu's voor percelen in pH-klassen 3 en 4 t.o.v. pH-klasse 2 (Figuur 28).

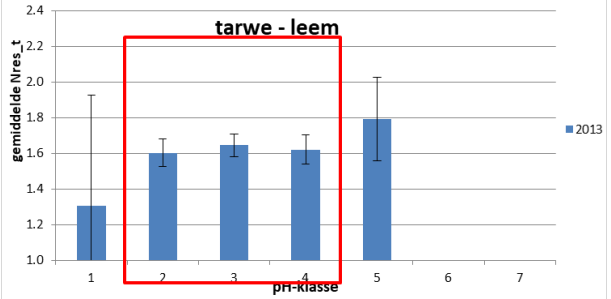

weiland - zand
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2012
2014
weiland - zandleem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2011
2012
2014
weiland - leem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2011
2012
weiland - klei
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2011
2012
2013
2014

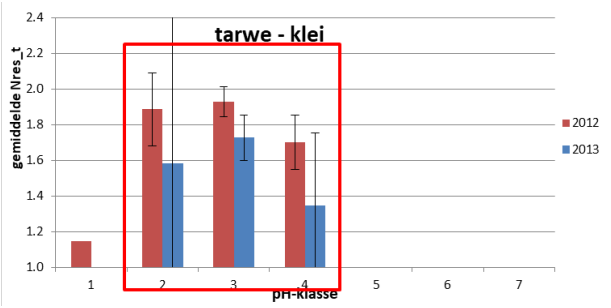

maïs - zand
gemiddelde Nres_tN/ha)
pH-klasse
2012
2013
2014

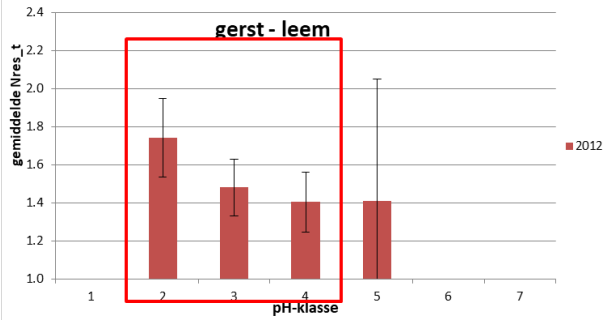

maïs - zandleem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2012
2013
2014

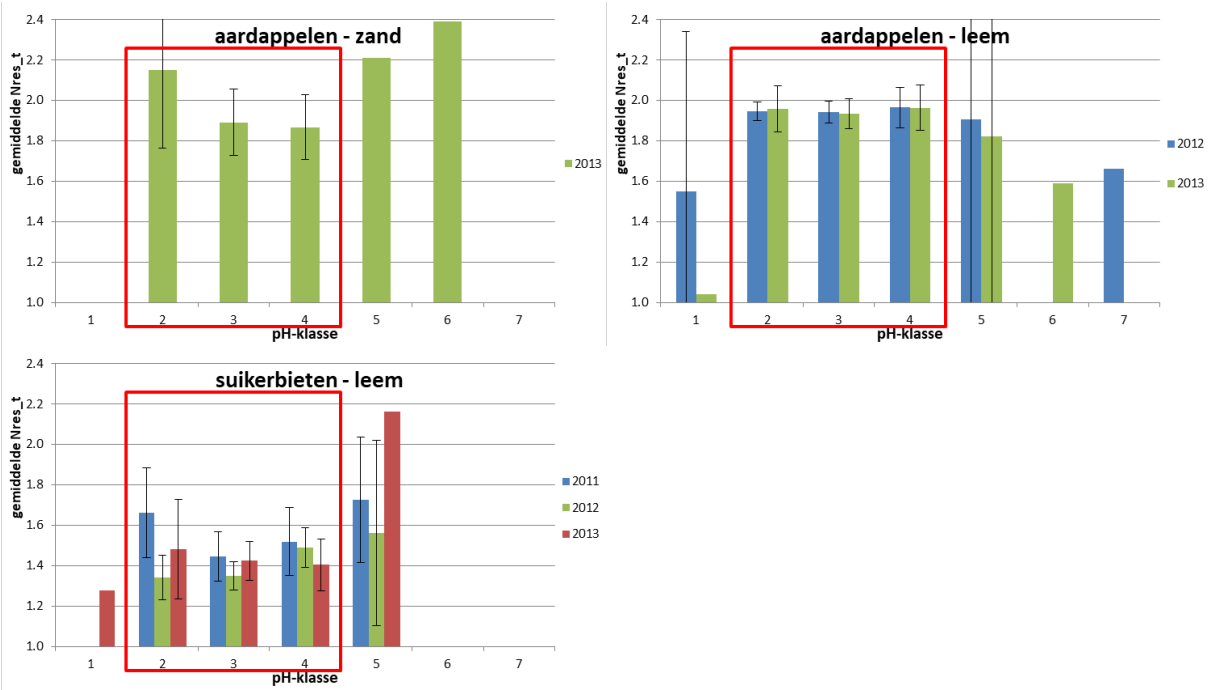
0


maïs - leem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2011
2013
2014


tarwe - leem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2013


tarwe - klei
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2012
2013


gerst - leem
gemiddelde Nres_t
pH-klasse
2012



Figuur 28: Gemiddelde nitraatresidu's i.f.v. pH-beoordelingsklasse voor de categorieën (teeltgroep*bodemtextuurklasse*jaar) waarvoor een significant effect van pH-beoordelingsklasse op het nitraatresidu werd berekend;
verticale lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval weer per jaar

5.4.6 Regressie-analyse getransformeerde nitraatresidu's

Enkelvoudige lineaire regressies werden uitgevoerd met pH_KCl als onafhankelijke variabele en Nres_t (getransformeerd nitraatresidu) als afhankelijke variabele. De bedoeling is om uit de gevonden regressies coëfficiënten af te leiden die gebruikt kunnen worden in Stap 5 om het effect van het optimaliseren van de pH op nitraatresidu's en nitraatuitspoeling te berekenen.

Aangezien het effect van de pH op het (getransformeerd) nitraatresidu waarschijnlijk niet lineair is en we vooral geïnteresseerd zijn in de linkerkant van de curve (te lage tot aan optimale pH-waarden), werd deze regressie-analyse enkel uitgevoerd op de gegevens van percelen met een pH kleiner of gelijk aan de optimale pH van het perceel (pH-klasse <=4).

In Tabel 13 worden de resultaten van deze enkelvoudige regressie-analyse weergegeven, voor akkers en weilandpercelen, globaal en per bodemtextuurklasse.

Voor akkers wordt globaal een significant negatieve regressiecoëfficiënt (-0,08) berekend, met een R^2 van 0,037. Dit betekent dat globaal gezien in akkerpercelen een verhoging van de pH (tot aan de optimale pH) zal zorgen voor een daling van het nitraatresidu.

Voor weilanden wordt globaal een significant positieve regressiecoëfficiënt (+0,04) berekend, met een R^2 van 0,004. Dit betekent dat globaal gezien in weilandpercelen een verhoging van de pH zou leiden tot een stijging van het nitraatresidu. Dit ligt in de lijn van de resultaten van de ANOVA-analyse op pH-klassen (zie 5.4.5).

Wanneer de dataset opgesplitst wordt per bodemtextuurklasse wordt voor akkers enkel nog een significante (negatieve) regressie berekend in zandgrond, met een R^2 van 0,003. Voor weilanden is de regressiecoëfficiënt

nog steeds positief, en significant voor zand-, zandleem en kleigrond, met een R^2 van respectievelijk 0,011, 0,004 en 0,002.

Algemene opmerking: de R^2-waarden zijn algemeen zeer laag, met waarden die variëren tussen 0,040 en 0,001 voor significante regressiemodellen (p-waarde < 0,05). Dit betekent dat slechts 0,1 tot 4,0 % van de totale variatie van de getransformeerde nitraatresidu's in de betreffende datasets verklaard wordt door de pH. Dit werd ook reeds in eerder onderzoek vastgesteld (Van Overtveld et al., 2011) en hangt samen met de grootte van de datasets en met het feit dat het nitraatresidu voornamelijk bepaald wordt door andere factoren, zoals bemesting, jaar, teeltgroep, organische-stofgehalte en bodemtextuur.

Tabel 13: Lineaire regressies van het log-getransformeerd nitraatresidu (Nres_t) i.f.v. pH-KCl voor weilanden en akkers, globaal en per bodemtextuurklasse
enkel percelen met pJ-klasse <=4; significante regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid

Teeltgroep	Textuurklasse	aantal percelen	Simple regression pH Model p	R^2adj	coefficients intercept	rc
akker		9090	0.0000	0.037	2.28	-0.08
akker	zand	3657	0.0004	0.003	2.10	-0.04
akker	zandleem	1221	0.2743	0.000		
akker	leem	3858	0.1581	0.000		
akker	klei	354	0.5701	-0.002		
weiland		6433	0.0000	0.004	1.33	0.04
weiland	zand	1373	0.0001	0.011	1.19	0.08
weiland	zandleem	1933	0.0026	0.004	1.29	0.04
weiland	leem	1526	0.1042	0.001		
weiland	klei	1601	0.0399	0.002	1.39	0.03

In een volgende stap werden de regressie-analyses voor akkers en weilanden verder opgesplitst per jaar (Tabel 14, kolommen 5 tot 8).

Aangezien o.a. uit diverse nitraatresidurapporten (Mestbank) al gebleken is dat nitraatresidu's niet alleen significant verschillen tussen jaren maar ook tussen teeltgroepen, is het voor de verdere berekeningen in stap 5 aangewezen om voor akkerpercelen aparte regressiecoëfficiënten per combinatie (teeltgroep*jaar*bodemtextuurklassse) te berekenen. De resultaten voor de combinaties waarvoor voldoende gegevens beschikbaar waren, worden weergegeven in de kolommen 5 tot 8 van Tabel 15.

Een probleem dat hierbij opduikt is dat voor een relatief groot aantal combinaties onvoldoende gegevens beschikbaar zijn om een betrouwbare regressie-analyse te kunnen uitvoeren. Daarom werd voor totale groep van de akkerpercelen een 2de analyse uitgevoerd met gestandaardiseerde Nres_t-waarden per combinatie (teeltgroep*jaar*bodemtextuurklasse):

Nres_t_z = (Nres_t - Nres_t_g)/Nres_t_stdev

waarbij

Nres_t = log-getransformeerd nitraatresidu
Nres_t_z = gestandaardiseerd log-getransformeerd nitraatresidu
Nres_t_g = gemiddeld log-getransformeerd nitraatresidu per combinatie
Nres_t_stdev = standaardafwijking van het log-getransformeerd nitraatresidu per combinatie

In de rechterkolommen van Tabel 14 worden de resultaten van de regressie-analyses per combinatie jaar*bodemtextuurklasse van Nres_t_z (gestandaardiseerde waarden) vergeleken met de resultaten van Nres_t (originele waarden). Van de 8 significante regressies met Nres_t worden er met Nres_t_z slechts 4 teruggevonden.

De regressiecoëfficiënten en intercepten die berekend werden voor de totale groep "akker" met de gestandaardiseerde waarden (rechterkolommen van Tabel 14) werden vervolgens teruggerekend naar coëfficiënten per teeltgroep, met de volgende formules:

rc(teeltgroep) = rc(akker) * Nres_t_stdev(teeltgroep)

intercept(teeltgroep) = intercept(akker) * Nres_t_stdev(teeltgroep) + Nres_t_g(teeltgroep)

waarbij rc = richtingscoëfficiënt.

De teruggerekende coëfficiënten per teeltgroep worden weergegeven in de rechterkolommen van Tabel 15.

Tabel 14: Lineaire regressies van het log-getransformeerd (Nres_t) en (voor akkerpercelen) het gestandaardiseerd getransformeerd nitraatresidu (Nres_t_z) i.f.v. pH-KCL, per jaar en per bodemtextuurklasse
enkel percelen met pH-klasse <=4; significantie regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid

Jaar	Teeltgroep	Textuurklasse	Aantal	Simple regression Nres_t (pH)				Simple regression Nres_t_z (pH)			
				Model				Model			
				p	R^2adj	coefficients		p	R^2adj	coefficients	
						intercept	pH			intercept	pH
2011	akker	zand	752	0.1904	0.001			0.1854	0.001		
2011	akker	zandleem	313	0.5522	-0.002			0.5813	-0.002		
2011	akker	leem	774	0.0460	0.004	2.17	-0.05	0.3655	0.000	0.39	-0.07
2011	akker	klei	107	0.0008	0.094	4.08	-0.30	0.1406	0.011	2.71	-0.38
2012	akker	zand	1040	0.0192	0.004	2.07	-0.05	0.0320	0.003	0.83	-0.16
2012	akker	zandleem	393	0.5570	-0.002			0.8315	-0.002		
2012	akker	leem	1549	0.0758	0.001	1.86	-0.03	0.8721	-0.001	0.04	-0.01
2012	akker	klei	106	0.8222	-0.009			0.8173	-0.009		
2013	akker	zand	865	0.0296	0.004	2.17	-0.05	0.0120	0.006	1.05	-0.20
2013	akker	zandleem	257	0.0015	0.035	2.34	-0.10	0.0056	0.026	1.66	-0.30
2013	akker	leem	882	0.0961	0.002	1.83	-0.03	0.7227	-0.001	0.10	-0.02
2013	akker	klei	81	0.0844	0.025	2.51	-0.13	0.2219	0.006	2.07	-0.30
2014	akker	zand	1000	0.1386	0.001			0.0634	0.002	0.72	-0.14
2014	akker	zandleem	258	0.5463	-0.002			0.6209	-0.003		
2014	akker	leem	653	0.5108	-0.001			0.3123	0.000		
2014	akker	klei	60	0.7063	-0.015			0.7574	-0.016		
2011	weiland	zand	820	0.5738	-0.001						
2011	weiland	zandleem	192	0.0086	0.031	0.87	0.14				
2011	weiland	leem	328	0.1574	0.003						
2011	weiland	klei	32	0.1104	0.052						
2012	weiland	zand	1033	0.9150	-0.001						
2012	weiland	zandleem	298	0.3008	0.000						
2012	weiland	leem	530	0.0776	0.004	1.23	0.05				
2012	weiland	klei	64	0.9958	-0.016						
2013	weiland	zand	888	0.2025	0.001						
2013	weiland	zandleem	237	0.4217	-0.001						
2013	weiland	leem	327	0.5331	-0.002						
2013	weiland	klei	60	0.0933	0.031	0.89	0.14				
2014	weiland	zand	983	0.1504	0.001						
2014	weiland	zandleem	263	0.2019	0.002						
2014	weiland	leem	312	0.8926	-0.003						
2014	weiland	klei	41	0.8691	-0.025						

Tabel 15: Lineaire regressies van het log-getransformeerd nitraatresidu (Nres_t) i.f.v. pH-KCL, per jaar, teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. log-getransformeerde nitraatresidu's (Nres_t, links) en gestandaardiseerde log-getransformeerde nitraatresidu's (Nres_t_z, rechts), waarbij de laatsten per teeltgroep teruggerekend werden
enkel percelen met pH-klasse <=4; significante regressies (p<0.1) zijn in het rood aangeduid

Jaar	Teeltgroep	Textuurklasse	aantal	Simple regression Nres_t (pH) Model				Simple regression Nres_t_z (pH) akker teruggerekende coëfficienten per teeltgroep		
				p	R^2adj	coefficients intercept	rc	p	coefficients intercept	rc
2011	maïs	zand	718	0.1954	0.001			0.1854		
2011	maïs	zandleem	241	0.2230	0.002			0.5813		
2011	maïs	leem	486	0.8146	-0.002			0.3655	2.04	-0.02
2011	maïs	klei	37	0.2772	0.006			0.1406	2.15	-0.11
2012	maïs	zand	957	0.0606	0.003	2.02	-0.04	0.0320	2.05	-0.04
2012	maïs	zandleem	304	0.6320	-0.003			0.8315		
2012	maïs	leem	671	0.3560	0.000			0.8721	1.72	0.00
2012	maïs	klei	32	0.4113	-0.010			0.8173		
2013	maïs	zand	792	0.0162	0.006	2.21	-0.06	0.0120	2.23	-0.06
2013	maïs	zandleem	197	0.0000	0.079	2.61	-0.15	0.0056	2.28	-0.09
2013	maïs	leem	456	0.2772	0.000			0.7227	1.71	-0.01
2013	maïs	klei	42	0.4739	-0.012			0.2219	2.23	-0.08
2014	maïs	zand	922	0.0402	0.003	2.14	-0.05	0.0634	2.12	-0.04
2014	maïs	zandleem	189	0.2406	0.002			0.6209		
2014	maïs	leem	317	0.3889	-0.001			0.3123		
2014	maïs	klei	15	0.6226	-0.066			0.7574		
2011	tarwe	zand	13	0.6704	-0.070			0.1854		
2011	tarwe	zandleem	14	0.0592	0.205	0.82	0.15	0.5813		
2011	tarwe	leem	121	0.0530	0.020	2.47	-0.12	0.3655	1.84	-0.02
2011	tarwe	klei	45	0.9034	-0.023			0.1406	2.85	-0.12
2012	tarwe	zand	32	0.8625	-0.032			0.0320	2.08	-0.07
2012	tarwe	zandleem	33	0.8850	-0.032			0.8315		
2012	tarwe	leem	485	0.9567	-0.002			0.8721	1.66	0.00
2012	tarwe	klei	57	0.4302	-0.007			0.8173		
2013	tarwe	zand	22	0.8852	-0.049			0.0120	2.08	-0.06
2013	tarwe	zandleem	17	0.1642	0.066			0.0056	2.14	-0.10
2013	tarwe	leem	183	0.4213	-0.002			0.7227	1.65	-0.01
2013	tarwe	klei	24	0.2087	0.029			0.2219	2.24	-0.09
2014	tarwe	zand	18	0.3384	-0.002			0.0634	1.84	-0.03
2014	tarwe	zandleem	21	0.2899	0.009			0.6209		
2014	tarwe	leem	176	0.5449	-0.004			0.3123		
2014	tarwe	klei	27	0.9861	-0.040			0.7574		
2011	gerst	leem	39	0.2949	0.034			0.3655	1.74	-0.02
2011	gerst	klei						0.1406	2.47	-0.05
2012	gerst	zand						0.0320	2.58	-0.12
2012	gerst	leem	64	0.0094	0.090	2.94	-0.22	0.8721	1.56	0.00
2013	gerst	zand						0.0120	2.43	-0.06
2013	gerst	zandleem						0.0056	2.41	-0.15
2013	gerst	leem	89	0.2961	0.001			0.7227	1.49	-0.01
2013	gerst	klei						0.2219	1.82	-0.03
2014	gerst	zand	16	0.0139	0.315	-0.18	0.35	0.0634	1.76	-0.05

2014	gerst	leem	38	0.2484	0.010			0.3123		
2011	aardappelen	zand	11	0.2713	0.036			0.1854		
2011	aardappelen	zandleem	31	0.4375	-0.013			0.5813		
2011	aardappelen	leem	61	0.7845	-0.016			0.3655	2.14	-0.02
2011	aardappelen	klei						0.1406	2.83	-0.10
2012	aardappelen	zand	35	0.2539	0.010			0.0320	2.14	-0.05
2012	aardappelen	zandleem	29	0.1149	0.056			0.8315		
2012	aardappelen	leem	182	0.1450	0.006			0.8721	1.95	0.00
2013	aardappelen	zand	27	0.2338	0.018			0.0120	2.17	-0.05
2013	aardappelen	zandleem	18	0.1605	0.064			0.0056	2.49	-0.11
2013	aardappelen	leem	71	0.2458	0.005			0.7227	1.96	-0.01
2013	aardappelen	klei						0.2219	2.15	-0.01
2014	aardappelen	zand	26	0.3561	-0.005			0.0634	2.10	-0.03
2014	aardappelen	zandleem	15	0.9933	-0.077			0.6209		
2014	aardappelen	leem	62	0.9442	-0.017			0.3123		
2011	suikerbieten	leem	44	0.6738	-0.019			0.3655	1.62	-0.02
2011	suikerbieten	klei	19	0.0000	0.634	10.91	-1.24	0.1406	2.61	-0.14
2012	suikerbieten	zand						0.0320	1.70	-0.03
2012	suikerbieten	leem	100	0.0966	0.018	0.81	0.09	0.8721	1.39	0.00
2013	suikerbieten	zand						0.0120	1.75	-0.05
2013	suikerbieten	zandleem						0.0056	1.85	-0.06
2013	suikerbieten	leem	52	0.7890	-0.019			0.7227	1.45	-0.01
2013	suikerbieten	klei	9	0.0536	0.353	5.14	-0.53	0.2219	2.26	-0.12
2014	suikerbieten	zand	11	0.0034	0.593	2.54	-0.19	0.0634	1.73	-0.02
2014	suikerbieten	leem	34	0.4062	-0.009			0.3123		
2014	suikerbieten	klei	11	0.7677	-0.100			0.7574		

Besluiten uit de lineaire regressie-analyses:

Weilanden:

- Gezien het hoge percentage weilandpercelen met pH in de streefzone of hoger is er gemiddeld geen verdere daling van de nitraatresidu's te verwachten door het verhogen van de pH. In de hierna volgende statistische analyse (mixed models) en ook verder in Stap 5 zullen we dan ook geen rekening houden met eventuele effecten van bekalking in weilanden.

Akkers:

- Zowel op basis van de log-getransformeerde nitraatresiduwaarden als op basis van de gestandaardiseerde log-getransformeerde waarden worden slechts voor een beperkt aantal combinaties (jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse) significante regressies teruggevonden.
- De gevonden regressiecoëfficiënten zijn in beide gevallen globaal negatief en variëren voor de significante regressies (behoudens enkele uitzonderingen bij de analyse met niet-gestandaardiseerde waarden) tussen -0,02 en -0,15.

5.4.7 General linear mixed model analyse op log-getransformeerde nitraatresidu's

Een alternatieve manier om het effect van de pH op het nitraatresidu in kaart te brengen, rekening houdend met de verschillende jaar*gewasgroep*bodemtextuurklasse-combinaties, is het uitvoeren van een mixed model analyse.

Analoog met de lineaire-regressieanalyses wilden we met deze analyse een model ontwikkelen dat toelaat om het effect van het optimaliseren van de pH op het nitraatresidu te berekenen voor de verschillende combinaties jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse. Daarom werden opnieuw enkel de gegevens van percelen met een pH kleiner of gelijk aan de optimale pH van het perceel (pH-klasse <=4) weerhouden.

Per gewasgroep werd een apart model ontwikkeld, omwille van de relatief grote verschillen in gemiddelde nitraatresidu's tussen de gewasgroepen, omwille van het feit dat de dataset ongebalanceerd is m.b.t. de gewasgroepen en tenslotte ook omdat uit eerdere statistische analyses van dergelijke datasets al gebleken is dat voor de verschillende gewasgroepen niet altijd dezelfde variabelen het grootste aandeel in de variatie van het nitraatresidu verklaren (Van Overtveld et al., 2011).

Een groot aantal modellen werd doorgerekend per teeltgroep, waarbij stapsgewijs de parameters pH (continue predictor), jaar en bodemtextuurklasse (categorische predictoren) en hun interacties werden toegevoegd of weggelaten. Uiteindelijk werd, per teeltgroep, telkens het model weerhouden met een maximale R^2 en waarvan alle parameters significant zijn ($p<0.05$) (Tabel 16).

Opvallend is dat in deze modellen de enkelvoudige parameter pH enkel weerhouden werd voor maïs. Voor de andere teeltgroepen bleek de parameter pH enkel in interactie met de bodemtextuurklasse een significante rol te spelen. Voor suikerbieten bleek ook de parameter jaar niet significant te zijn.

Tabel 16: General linear mixed model analyse op log-getransformeerde nitraatresidu's: weerhouden modellen per teeltgroep, p-waarden per weerhouden parameter en R^2 van het model (GS_klas = bodemtextuurklasse)

	Parameters							R^2
	Continu	Categorisch		Interacties met pH		interactie categorisch	3-voudige interactie	
	pH	jaar	GS_klas	jaar*pH	GS_klas*pH	jaar*GS_klas	jaar*GS_klas*pH	
maïs	0.0000	0.0000	0.0000	/		0.0000	/	0.1217
tarwe	/	0.0014	/	/	0.0000	/	/	0.0551
gerst	/	0.0239	/	/	0.0000	0.0112	/	0.1433
aardappelen	/	0.0001	0.0173	/	0.0113	/	/	0.0567
suikerbieten	/	/	0.0013	/	0.0019	0.0063	/	0.0938

De weerhouden modellen voor de 5 grootste akkerteeltgroepen hadden de volgende vorm:

Nres_t (getransformeers nitraatresidu = intercept +

maïs: jaar + bodem + jaar*bodem + **pH*(-0.03)**

tarwe: jaar + **pH*(bodem: 0.00, -0.01, -0.01, +0.02)**

gerst: jaar + jaar*bodem + **pH*(bodem: +0.03, -0.02, -0.03, +0.01)**

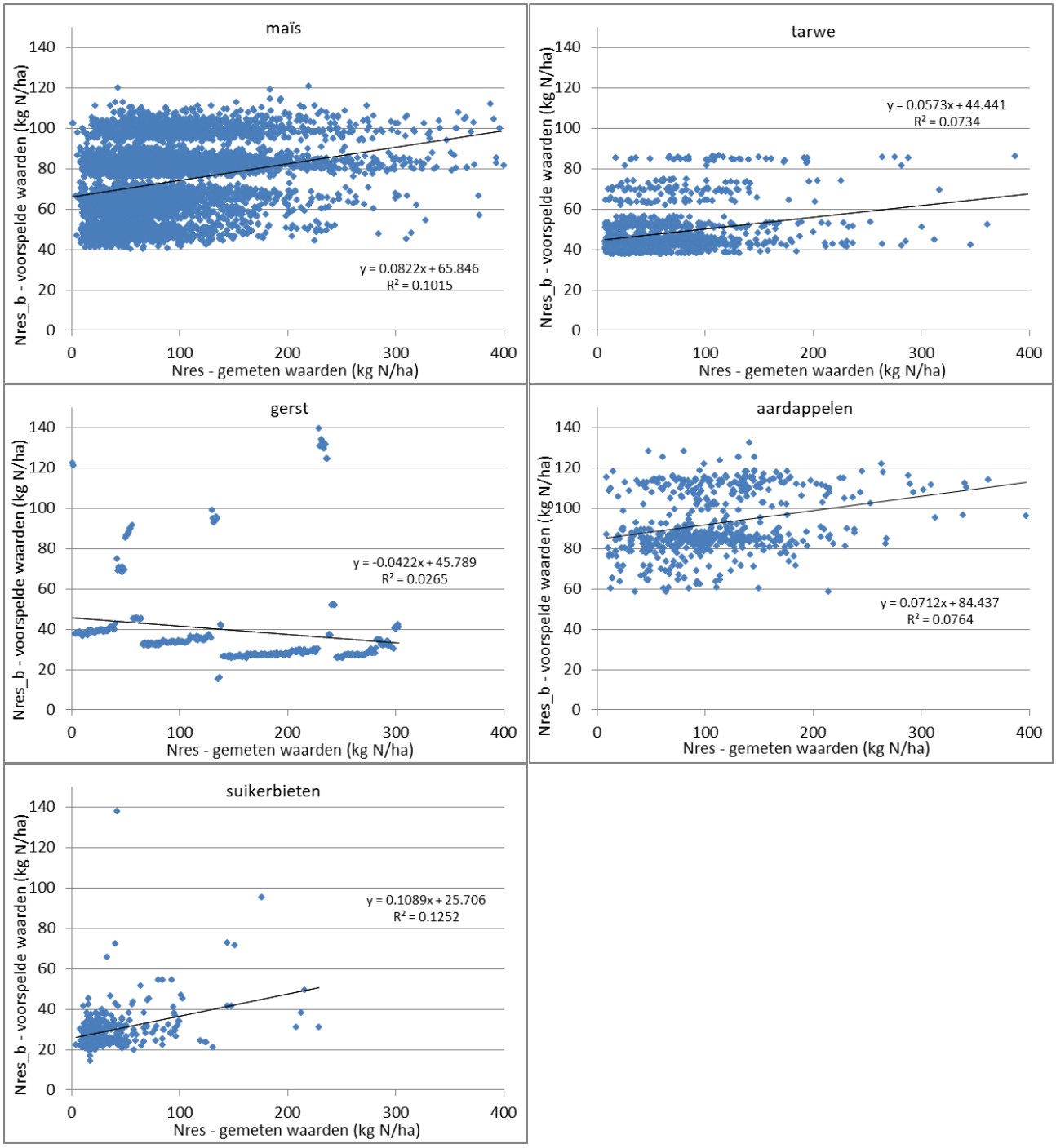
aardappelen: jaar + bodem + **pH*(bodem: -0.14, +0.03, +0.03, -0,01)**

suikerbieten: bodem + jaar*bodem + **pH*(bodem: -0.08, +0.43, +0.05, -0.39)**

waarbij de regressiecoëfficiënt voor maïs -0,03 bedroeg en voor de andere teelten afhing van het bodemtype (opgegeven in de formules achtereenvolgens voor zand, zandleem, leem en klei).

Met de weerhouden modellen werden voorspelde waarden van Nres_t (log-getransformeerde nitraatresidu's) berekend, die vervolgens opnieuw teruggerekend werden naar Nres_b (teruggetransformeerde nitraatresidu-waarden) volgens de formule in 5.4.4. In Figuur 29 worden deze voorspelde Nres_b-waarden uitgezet t.o.v. de gemeten Nres-waarden.

Hieruit blijkt dat de voorspellende modellen (slechts) 2,7% (gerst) tot 12,5% (suikerbieten) van de totale variatie in de datasets verklaren. De relatief lage voorspellende kracht van de modellen heeft als gevolg dat de variantie in de gemeten waarden veel groter is dan deze in de voorspelde waarden. Zo worden er, bij hoge gemeten waarden, ook in verhouding hogere waarden voorspeld dan bij lagere gemeten waarden (behalve bij gerst), maar bij lagere gemeten waarden worden zowel hoge als lage waarden voorspeld.



Figuur 29: Voorspelde vs. gemeten nitraatresidu-waarden met optimale mixed models per teeltgroep, EVANIR-dataset 2012-2014

5.4.8 Besluit

Weilanden: niet in rekening brengen in optimalisatie-scenario pH (stap 5) aangezien de pH in de meeste percelen al in orde is en het effect van stijgende pH op nitraatresidu's zelfs eerder positief (hogere residu's bij hogere pH) blijkt te zijn.

Akkers:

- uit de verschillende statistische analysemethoden (correlaties, regressies, mixed models) blijkt steeds een overwegend negatief effect voor de percelen met sub-optimale pH (nitraatresidu daalt bij stijgende pH) → biedt mogelijkheden voor het optimalisatie-scenario van stap 5.
- de regressie-coëfficiënten variëren tussen de verschillende combinaties jaar*teeltgroep*bodemtextuurklasse en zijn niet altijd significant; voor de significante regressies worden coëfficiënten tussen 0,02 en 0,15 berekend (voor de log-getransformeerde nitraatresidu's!).
- de mixed-model-analyses geven aan dat pH enkel voor maïs een significant enkelvoudig effect heeft op het log-getransformeerd nitraatresidu (met coëfficiënt 0,03, d.w.z. dezelfde grootteorde als deze van de lineraire regressies); bij de andere teeltgroepen hangt het effect van de pH af van de bodemtextuurklasse (interactie-effect) en kan zowel positief als negatief zijn.

5.4.9 Output - leverbaarheden

L8: Statistische verbanden tussen bodem-pH en nitraatresidu i.f.v. relevante covariabelen: zie 5.4.8.

5.5 STAP 4: THEORETISCHE BEREKENING N-UITSPOELING TIJDENS DE WINTER UIT LANDBOUWPERCELEN IN VLAANDEREN, HUIDIGE SITUATIE

5.5.1 Aanpak

De theoretische berekening van de N-uitspoeling in Vlaanderen (huidige situatie) gebeurde in twee stappen:

1. Berekening van de hoeveelheid nitraat-N in het bodemprofiel tijdens de winter,
2. Berekening van de hoeveelheid nitraat-N die verder uitspoelt tot onderaan de wortelzone en naar het grondwater

Een belangrijke vereenvoudiging/aanname in deze benadering is dat enkel de nitraatuitspoeling tijdens de winter werd beschouwd en dat eventuele uitspoelingen tijdens het groeiseizoen werden verwaarloosd.

In overleg met de opdrachtgevers werd besloten om de theoretische berekeningen te baseren op de gegevens van de jaren 2012, 2013 en 2014. Deze jaren komen overeen met eerder “normale” jaren met betrekking tot weersomstandigheden en gewasontwikkeling, terwijl de recentere jaren (2015-2018) uitzonderlijke omstandigheden (zeer droog of zeer nat) en/of abnormaal lage gewasontwikkelingen kenden, met betekenisvolle effecten op de nitraatresidu’s.

5.5.2 Gebruikte data

5.5.2.1 Dataset BDB: EVANIR-dataset

Uit de EVANIR-databank (BDB, zie 5.1.1) werden de data van 2012, 2013 en 2014 samengevoegd in een sub-dataset.

De percelen werden ingedeeld in de volgende teeltgroepen: weiland, maïs, tarwe, gerst, andere granen, aardappelen, suikerbieten, wortelen, erwten, bloemkool, erwten, andere groenten, andere akkerteelten. Deze teeltgroepen samen vertegenwoordigen ongeveer 96% van het Vlaams landbouwareaal. De volgende teelten werden niet meegenomen: andere meerjarige teelten dan grasland (fruitteelt, bomen (bos), sierteelt, aardbeien, …), teelten onder glas, braak, natuurbeheer.

Enkel percelen waar zowel het nitraatresidu, de bodemtextuurklasse, de pH en het %C werden bepaald, werden meegenomen in deze analyse. In Tabel 17 worden de aantallen percelen (nitraatresidumetingen) en het areaal (ha) per teeltgroep en per bodemtextuurklasse weergegeven. Let wel, dit is een beperktere dataset dan deze gebruikt in 5.2.5. Deze metingen betreffen bovendien voornamelijk derogatie- en opvolgstalen, en de ruimtelijke verdeling van deze stalen over Vlaanderen komt niet overeen met de verdeling van de totale dataset, gebruikt in 5.2.5.

In de verdere toelichtingen wordt deze BDB-EVANIR-subdataset steeds aangeduid als “EVANIR-dataset”.

Tabel 17: Aantal en areaal van de nitraatresidumetingen waarbij ook pH en %C werden bepaald (EVANIR-dataset), per teeltgroep en per bodemtextuurklasse en voor gans Vlaanderen (2012-2014)

Teeltgroep	Zand		Zandleem		Leem		Klei		Vlaanderen	
	aantal metingen	areaal ha	aantal metingen	areaal ha	aantal metingen	areaal ha	aantal metingen	areaal ha	aantal metingen	areaal ha
weiland	3576	7154	1049	2001	1428	2832	481	1172	6534	13160
maïs	3241	7785	831	1516	1611	2588	92	272	5775	12161
tarwe	174	310	112	159	939	1775	115	281	1340	2525
gerst	36	111	17	24	200	421	15	43	268	599
andere granen	10	26	3	4	21	30	0	0	34	60
aardappelen	106	209	83	128	375	770	10	21	574	1129
suikerbieten	38	247	20	38	197	446	26	63	281	795
wortelen	7	8	18	32	15	42	0	0	40	81
erwten	5	10	4	4	15	32	0	0	24	46
bloemkool	4	5	33	37	40	56	2	6	79	104
prei	19	19	38	46	65	82	1	0	123	148
andere groenten	63	162	81	109	223	435	2	1	369	708
andere akkerteelten	310	234	111	169	242	359	16	49	679	812
totaal	7589	16280	2400	4269	5371	9869	760	1909	16120	32327

5.5.2.2 VLM-dataset percelen

De oppervlakte-verdeling van de bodemtextuurklassen per teeltgroep die berekend werden o.b.v. de EVANIR-dataset zijn niet volledig representatief voor heel Vlaanderen. Aangezien we in de verdere scenario’s de berekende gemiddelden per teeltgroep en per bodemtextuurklasse willen extrapoleren naar heel Vlaanderen werd geopteerd om een meer relevante inschatting te maken van de oppervlakte-verdeling van de bodemtextuurklassen per teeltgroep op basis van de landbouwstreken. In de VLM-percelendataset (2012-2014) wordt voor elk perceel opgegeven in welke landbouwstreek het gelegen is. De opgegeven landbouwstreek per perceel werd telkens gelinkt aan één overeenkomstige bodemtextuurklasse als volgt:

- Duinen, Vlaamse Zandstreek, Kempen → zand
- Zandleemstreek → zandleem
- Leemstreek, Weidestreek → leem
- Polders → klei

We zijn er ons van bewust dat deze koppeling niet één op één overeenkomt met de werkelijkheid. Zo komen in de Zandleemstreek ook zand- of leembodems voor, in de Zandstreek komen ook zandleembodems voor enz. Maar we gaan er van uit dat deze benadering volstaat voor de doelstelling van dit onderzoek, nl. een gefundeerde schatting maken van de hoeveelheid nitraat die per jaar uitspoelt naar het grondwater in landbouwpercelen in Vlaanderen, tijdens de winter.

In Tabel 18 worden de oppervlakte-aandelen die op deze manier berekend werden voor de teeltgroep*bodemtextuurklasse-combinaties vergeleken met deze bekomen op basis van de beperkte nitraatresidu-dataset. Hieruit blijkt inderdaad dat beide verdelingen niet altijd overeenkomen.

Tabel 18: Oppervlakte-aandeel (%) van de bodemtextuurklassen per teeltgroep op basis van de landbouwstreken (volgens percelendataset VLM 2014), in vergelijking met de oppervlakte-aandelen op basis van de EVANIR-dataset

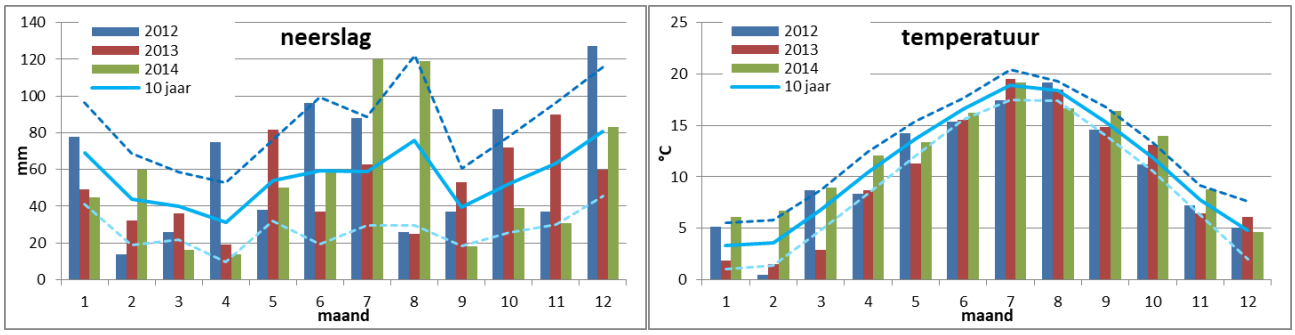
Teeltgroep	Zand				Zandleem				Leem				Klei				Vlaanderen			
	op basis van:				op basis van:				op basis van:				op basis van:				op basis van:			
	Landbouwstreek Kempen + Vl.Zandstreek		EVANIR-dataset		Landbouwstreek Zandleemstreek		EVANIR-dataset		Landbouwstreek Leemstreek + Weidestreek		EVANIR-dataset		Landbouwstreek Polders		EVANIR-dataset		VLM-dataset		EVANIR-dataset	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
weiland	146276	57	7154	54	72938	29	2001	15	13960	5	2832	22	22163	9	1172	9	255338	100	13160	100
maïs	115629	60	7785	64	56178	29	1516	12	9719	5	2588	21	9988	5	272	2	191513	100	12161	100
tarwe	7593	11	310	12	27607	42	159	6	15250	23	1775	70	15994	24	281	11	66444	100	2525	100
gerst	2366	17	111	18	6199	45	24	4	3127	23	421	70	1975	14	43	7	13667	100	599	100
andere granen	2650	61	26	43	1204	28	4	6	241	6	30	50	250	6	0	0	4346	100	60	100
aardappelen	12848	34	209	19	17564	47	128	11	4217	11	770	68	3100	8	21	2	37728	100	1129	100
suikerbieten	1933	9	247	31	8566	42	38	5	6481	32	446	56	3392	17	63	8	20372	100	795	100
wortelen	1319	48	8	9	1053	39	32	39	351	13	42	52	9	0	0	0	2733	100	81	100
erwten	482	17	10	21	1142	40	4	10	866	31	32	69	330	12	0	0	2820	100	46	100
bloemkool	967	32	5	5	1941	65	37	36	40	1	56	54	45	2	6	6	2993	100	104	100
prei	1230	42	19	13	1699	57	46	31	13	0	82	56	18	1	0	0	2961	100	148	100
andere groenten	5994	32	162	23	9626	52	109	15	1625	9	435	61	1215	7	1	0	18460	100	708	100
andere akkerteelten	9294	43	234	29	7381	34	169	21	1939	9	359	44	2873	13	49	6	21486	100	812	100
totaal	308580	48%	16280	50%	213098	33%	4269	13%	57830	9%	9869	31%	61352	10%	1909	6%	640860	100%	32327	100%

5.5.2.3 VLM-dataset nitraatresidu's

De nitraatresidu's in de EVANIR-dataset liggen gemiddeld iets hoger dan deze van de VLM-dataset (zie 5.2.5). Daarom werden de hierna voorgestelde berekeningen van de hoeveelheid nitraat in het bodemprofiel en onderaan de wortelzone telkens 2x uitgevoerd: een eerste keer op basis van de gemiddelde nitraatresidu's van de EVANIR-dataset en een tweede keer op basis van de gemiddelde nitraatresidu's van de VLM-dataset (zie ook verder, 5.5.3.2).

5.5.2.4 Meteo 2012-2013-2014

In Figuur 30 worden de gemiddelde meteo-gegevens van 2012, 2013 en 2014 voorgesteld in vergelijking met de gemiddelde (normale) waarden van de laatste 10 jaar, voor Melsbroek (temperatuur, ET0) en Nossegem (waterinfo VMM) (neerslag).



Figuur 30: Neerslag en gemiddelde temperatuur per maand in Nossegem en Melsbroek voor de jaren 2012, 2013 en 2014 in vergelijking met de gemiddelde waarden van de laatste 10 jaar (stippellijnen geven de standaardafwijking aan) (bron: Metagri en Waterinfo, VMM)

5.5.3 Berekening van de hoeveelheid nitraat-N in het bodemprofiel tijdens de winter

5.5.3.1 Aanpak

Alle berekeningen gebeurden per perceel in de EVANIR-dataset, waarna de resultaten werden samengeteld en geëxtrapoleerd naar schaal Vlaanderen.

Voor de berekening van de hoeveelheid nitraat-N in het bodemprofiel (0-90 cm) tijdens de winter werd steeds vertrokken van het nitraatresidu in het najaar.

De bodemprocessen tijdens de winter (van november tot en met maart) werden benaderd op een mechanistische manier:

- Eventuele gewasopname tijdens de winter hangt af van de gewassen die aanwezig zijn. Dit werd afgeleid uit de beschikbare gegevens in de dataset m.b.t. de aanwezige en voorziene hoofd- en nateelten.
- De mineralisatie werd berekend i.f.v. de bodemtextuur en het organische-koolstofgehalte, m.b.v. de gemiddelde maandelijkse cijfers die opgesteld werden in het N-eco²-project (Herelixka et al., 2002). Het effect van de pH op dit proces werd als verwaarloosbaar of onvoorspelbaar beschouwd (zie 4.2.1.1).
- Andere processen zoals denitrificatie, ammoniakale vervluchtiging en stikstoffixatie werden eveneens verwaarloosd (zie 4.2.1.2, 4.2.1.3 en 4.2.1.4).

De berekening van de totale hoeveelheid stikstof in het bodemprofiel die kan doorspoelen is dan gelijk aan:

N-residu - N-gewasopname tijdens de winter + N-mineralisatie tijdens de winter

5.5.3.2 Nitraatresidu in het najaar

In Tabel 19 worden de gemiddelde nitraatresidu's per teeltgroep*bodemtextuurklasse en totaal voor Vlaanderen gegeven. De omrekening van de residu's uitgedrukt in kg N/ha naar totale hoeveelheden (kg N) per teeltgroep*bodemtextuurklasse en voor gans Vlaanderen gebeurde op basis van de oppervlakte-aandelen van de bodemtextuurklassen per teeltgroep volgens de landbouwstreken (zie hoger) en op basis van de teeltarealen volgens de VLM-percelendataset van 2014 (zie Tabel 18).

Opgepast, de gemiddelde nitraatresidu's in Tabel 19 verschillen van de gemiddelden die opgegeven werden in 5.2.5. Dit heeft te maken met het feit dat de gebruikte datasets verschillen (zie hoger). In deze analyse werd een beperktere dataset gebruikt met enkel de metingen waarbij ook pH en %C bepaald werden (EVANIR-dataset). Deze metingen betreffen voornamelijk derogatie- en opvolgstalen, en de ruimtelijke verdeling van deze stalen over Vlaanderen komt niet overeen met de verdeling van de totale dataset, gebruikt in 5.2.5.

In Tabel 20 wordt daarom een analoge berekening gemaakt van de totale nitraatresidu-hoeveelheden, maar dan gebaseerd op de gemiddelde nitraatresidu-cijfers volgens de VLM-dataset (ingedeeld in bodemtextuurklassen op basis van de landbouwstreek, zoals hoger). Doordat de gemiddelde nitraatresiducijfers op basis van de VLM-dataset lager waren dan deze op basis van de BDB-dataset (zie 5.2.5) liggen ook de totale cijfers voor Vlaanderen lager.

Tabel 19: Gemiddelde nitraatresidu's per teeltgroep en bodemtextuurklasse o.b.v. de EVANIR-dataset (2012-2014), resultaten geëxtrapoleerd naar Vlaanderen

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	areaal	nitraatresidu		areaal	Nitraatresidu		areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu	
	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N
weiland	146277	46	6,71	72939	44	3,18	13960	47	0,66	22164	73	1,62	255340	48	12,16
maïs	115631	110	12,74	56179	74	4,17	9719	66	0,64	9988	55	0,55	191517	95	18,10
tarwe	7593	69	0,53	27607	63	1,73	15250	56	0,85	15995	73	1,17	66444	60	4,27
gerst	2366	96	0,23	6199	46	0,28	3127	38	0,12	1975	47	0,09	13667	50	0,73
andere granen	2650	24	0,06	1204	53	0,06	241	57	0,01	250		0,00	4346	43	0,14
aardappelen	12848	100	1,28	17564	100	1,76	4217	109	0,46	3100	96	0,30	37729	106	3,79
suikerbieten	1933	44	0,08	8566	32	0,27	6481	31	0,20	3392	54	0,18	20372	37	0,74
wortelen	1319	115	0,15	1053	53	0,06	351	36	0,01	9		0,00	2733	50	0,22
erwten	482	125	0,06	1142	33	0,04	866	68	0,06	330		0,00	2820	77	0,16
bloemkool	967	84	0,08	1941	79	0,15	40	64	0,00	45	285	0,01	2993	83	0,25
prei	1230	93	0,11	1699	80	0,14	13	116	0,00	18	12	0,00	2961	102	0,25
andere groenten	5994	121	0,73	9626	83	0,80	1625	70	0,11	1215	166	0,20	18460	84	1,84
andere akkerteelten	9294	64	0,59	7381	67	0,49	1939	71	0,14	2873	75	0,21	21486	68	1,44
totaal	308584	79	23,36	213101	59	13,13	57830	60	3,27	61353	70	4,33	640868	70	44,09

Tabel 20: Gemiddelde nitraatresidu's per teeltgroep en bodemtextuurklasse o.b.v. de VLM-dataset 2012-2014), resultaten geëxtrapoleerd naar Vlaanderen

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu		areaal	nitraatresidu	
	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N
weiland	146277	40	5,83	72939	39	2,85	13960	37	0,52	22164	63	1,40	255340	41	10,59
maïs	115631	76	8,76	56179	59	3,29	9719	57	0,55	9988	67	0,67	191517	69	13,28
tarwe	7593	55	0,42	27607	56	1,54	15250	45	0,69	15995	72	1,15	66444	55	3,80
gerst	2366	76	0,18	6199	45	0,28	3127	44	0,14	1975	71	0,14	13667	52	0,74
andere granen	2650	95	0,25	1204	59	0,07	241	52	0,01	250			4346	85	0,35
aardappelen	12848	87	1,12	17564	92	1,62	4217	90	0,38	3100	86	0,27	37729	90	3,38
suikerbieten	1933	45	0,09	8566	28	0,24	6481	29	0,19	3392	47	0,16	20372	32	0,68
wortelen	1319	46	0,06	1053	57	0,06	351	30	0,01	9			2733	50	0,13
erwten	482	143	0,07	1142	58	0,07	866	39	0,03	330			2820	91	0,18
bloemkool	967	87	0,08	1941	70	0,14	40		0,00	45	315	0,01	2993	79	0,24
prei	1230	77	0,10	1699	83	0,14	13	11	0,00	18			2961	80	0,24
andere groenten	5994	107	0,64	9626	65	0,63	1625	64	0,10	1215	85	0,10	18460	78	1,48
andere akkerteelten	9294	59	0,55	7381	66	0,49	1939	46	0,09	2873	74	0,21	21486	62	1,34
totaal	308584	58	18,14	213101	53	11,40	57830	47	2,72	61353	66	4,12	640868	56	36,38

5.5.3.3 Gewasopname tijdens de winter

Voor de berekening van de N-gewasopname tijdens de winter werd rekening gehouden met de volgende mogelijke winterbedekkingen: wintertarwe, wintergerst, andere wintergranen, winterkoolzaad, weiland, grasachtige groenbedekkers, niet-grasachtige groenbedekkers.

Indien groenten als 2de teelt opgegeven worden, werd geen winterbedekking opgegeven, aangezien er geen info is over het zaai-/planttijdstip van deze teelten (winterteelten, bv. kolen, prei,…?).

De gewasopname in de winter werd berekend op basis van vaste N-hoeveelheden per type van aanwezige winterbedekking (zie 4.2.1.5 en Van Opstal et al., 2014):

- Grasachtige groenbedekkers: 90 kg N/ha totaal waarvan 60% tijdens de winter = 54 kg N/ha
- Niet-grasachtige groenbedekkers: 70 kg N/ha totaal waarvan 45% tijdens de winter = 31,5 kg N/ha
- Grasland: 400 kg N/ha totaal waarvan 11% tijdens de winter = 44 kg N/ha
- Wintertarwe: 280 kg N/ha totaal waarvan 19% tijdens de winter = 53,2 kg N/ha
- Wintergerst: 180 kg N/ha totaal waarvan 19% tijdens de winter = 34,2 kg N/ha
- Wintergranen: 180 kg N/ha totaal waarvan 19% tijdens de winter = 34,2 kg N/ha
- Winterkoolzaad: 250 kg N/ha totaal waarvan 35% tijdens de winter = 87,5 kg N/ha

In Tabel 21 wordt de totale gewasopname van stikstof tijdens de winter per teeltgroep*bodemtextuurklasse en totaal voor Vlaanderen gegeven.

De omrekening van de N-opname uitgedrukt in kg N/ha naar totale hoeveelheden (kg N) per teeltgroep*bodemtextuurklasse en voor gans Vlaanderen gebeurde op basis van de oppervlakte-aandelen van de bodemtextuurklassen per teeltgroep volgens de landbouwstreken (zie hoger) en op basis van de teeltarealen volgens de percelendataset van 2014 aangeleverd door de VLM (zie Tabel 18).

Het oppervlakte-aandeel (%) van percelen met een winterbedekking werd berekend op basis van de beschikbare teeltinformatie in de BDB dataset en geëxtrapoleerd naar heel Vlaanderen o.b.v.het oppervlakte-aandeel per teeltgroep volgens de percelendataset 2014 aangeleverd door de VLM.

Op basis van deze berekeningen blijkt dat globaal in Vlaanderen:

- bijna alle weilandpercelen een bodembedekking hebben (dus blijven bestaan) tijdens de winter,
- 23% van de akkerpercelen een bodembedekking hebben tijdens de winter,
- ongeveer 60% van de tarwe- en gerstpercelen een bodembedekking hebben tijdens de winter (groenbedekker); dit is het geval in alle bodemtexturen behalve de kleigronden, daar ligt het percentage lager,
- het percentage maïspercelen met een groenbedekker tijdens de winter schommelt tussen 1% en 21% en gemiddeld 17% bedraagt.

Tabel 21: Gemiddelde gewasopname van stikstof tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl,Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	areaal	met winter-bedekking	N-opname winter	areaal	met winter-bedekking	N-opname winter	areaal	met winter-bedekking	N-opname winter	Areaal	met winter-bedekking	N-opname winter	areaal	met winter-bedekking	N-opname winter
	ha	%	10^6 kg N	ha	%	10^6 kg N	ha	%	10^6 kg N	Ha	%	10^6 kg N	ha	%	10^6 kg N
weiland	146277	99	6,38	72939	99	3,18	13960	100	0,61	22164	100	0,97	255340	99	11,14
maïs	115631	21	1,30	56179	12	0,35	9719	8	0,04	9988	1	0,00	191517	17	1,69
tarwe	7593	50	0,18	27607	59	0,74	15250	60	0,37	15995	40	0,30	66444	57	1,59
gerst	2366	88	0,08	6199	67	0,19	3127	60	0,07	1975	24	0,02	13667	63	0,36
andere granen	2650	8	0,01	1204	68	0,03	241	69	0,01	250	0	0,00	4346	42	0,04
aardappelen	12848	18	0,12	17564	26	0,23	4217	21	0,05	3100	26	0,04	37729	21	0,44
suikerbieten	1933	1	0,00	8566	3	0,01	6481	2	0,01	3392	5	0,01	20372	2	0,03
wortelen	1319	31	0,02	1053	16	0,01	351	2	0,00	9	0	0,00	2733	10	0,03
erwten	482	70	0,02	1142	76	0,05	866	63	0,03	330	0	0,00	2820	66	0,09
bloemkool	967	24	0,01	1941	14	0,01	40	36	0,00	45	0	0,00	2993	26	0,02
prei	1230	21	0,01	1699	2	0,00	13	1	0,00	18	0	0,00	2961	4	0,01
andere groenten	5994	33	0,07	9626	9	0,04	1625	18	0,01	1215	75	0,05	18460	20	0,18
andere akkerteelten	9294	12	0,05	7381	14	0,05	1939	20	0,02	2873	55	0,12	21486	19	0,24
totaal akker	162307	22	1,87	140161	17	1,71	43870	27	0,60	39189	22	0,54	385527	23	4,73
totaal	308584	56	8,26	213101	55	4,90	57830	48	1,21	61353	70	1,51	640868	54	15,87

5.5.3.4 N-mineralisatie tijdens de winter

De berekening van de N-mineralisatie tijdens de winter gebeurde o.b.v. het organische-C-gehalte van de bodem in de bouwvoor, i.e. tot 30 cm diepte (staalnamediepte voor C-bepaling in de EVANIR-dataset). Dezelfde diepte werd ook toegepast voor de weilandpercelen. Het gemeten OC-gehalte in de weilandpercelen (tot 6 cm diepte) werd daarom telkens herberekend naar 30 cm waarbij we er van uitgingen dat het gemiddeld C-gehalte op 30 cm gelijk is aan 80% van het C-gehalte op 6 cm (op basis van intern overleg met experten van de Bodemkundige Dienst van België).

De N-mineralisatie tijdens de winter werd berekend op basis van de k-waarden (mineralisatiesnelheden) per bodemtextuurklasse uit het Neco²-project (Herelixka et al., 2002), die geïntrapoleerd werden voor organische-C-gehalten tussen 0.1 en 8.0 %; deze k-waarden werden ook toegepast op de weilanden met herberekende C-gehalten.

In Tabel 22 wordt de totale N-mineralisatie tijdens de winter teeltgroep*bodemtextuurklasse en totaal voor Vlaanderen gegeven.

De omrekening van de N-mineralisatie uitgedrukt in kg N/ha naar totale hoeveelheden (kg N) per teeltgroep*bodemtextuurklasse en voor gans Vlaanderen gebeurde op basis van de oppervlakte-aandelen van de bodemtextuurklassen per teeltgroep volgens de landbouwstreken (zie hoger) en op basis van de teeltarealen volgens de percelendataset van 2014 aangeleverd door de VLM (zie Tabel 18).

Tabel 22: Gemiddelde stikstofmineralisatie tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	areaal	mineralisatie winter		areaal	mineralisatie winter		areaal	mineralisatie winter		areaal	mineralisatie winter		areaal	mineralisatie winter	
	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	10^6 kg N
weiland	146277	58	8,50	72939	58	4,26	13960	45	0,62	22164	106	2,35	255340	59	15,73
Maïs	115631	67	7,70	56179	59	3,33	9719	39	0,38	9988	67	0,67	191517	60	12,08
Tarwe	7593	58	0,44	27607	54	1,49	15250	38	0,58	15995	66	1,05	66444	44	3,56
Gerst	2366	67	0,16	6199	48	0,30	3127	35	0,11	1975	68	0,13	13667	44	0,70
andere granen	2650	75	0,20	1204	54	0,06	241	38	0,01	250		0,00	4346	55	0,27
aardappelen	12848	64	0,82	17564	52	0,92	4217	37	0,16	3100	62	0,19	37729	44	2,09
suikerbieten	1933	57	0,11	8566	47	0,40	6481	37	0,24	3392	72	0,24	20372	47	1,00
wortelen	1319	47	0,06	1053	45	0,05	351	35	0,01	9		0,00	2733	40	0,12
erwten	482	55	0,03	1142	56	0,06	866	37	0,03	330		0,00	2820	43	0,12
bloemkool	967	46	0,04	1941	52	0,10	40	37	0,00	45	40	0,00	2993	43	0,15
Prei	1230	45	0,06	1699	42	0,07	13	35	0,00	18	31	0,00	2961	38	0,13
andere groenten	5994	69	0,41	9626	46	0,44	1625	38	0,06	1215	63	0,08	18460	46	0,99
andere akkerteelten	9294	67	0,62	7381	56	0,42	1939	38	0,07	2873	62	0,18	21486	52	1,29
Totaal	308584	63	19,15	213101	57	11,91	57830	40	2,28	61353	91	4,90	640868	57	38,24

5.5.3.5 Gemiddelde N-hoeveelheid in het bodemprofiel tijdens de winter per teeltgroep*bodemtextuurklasse

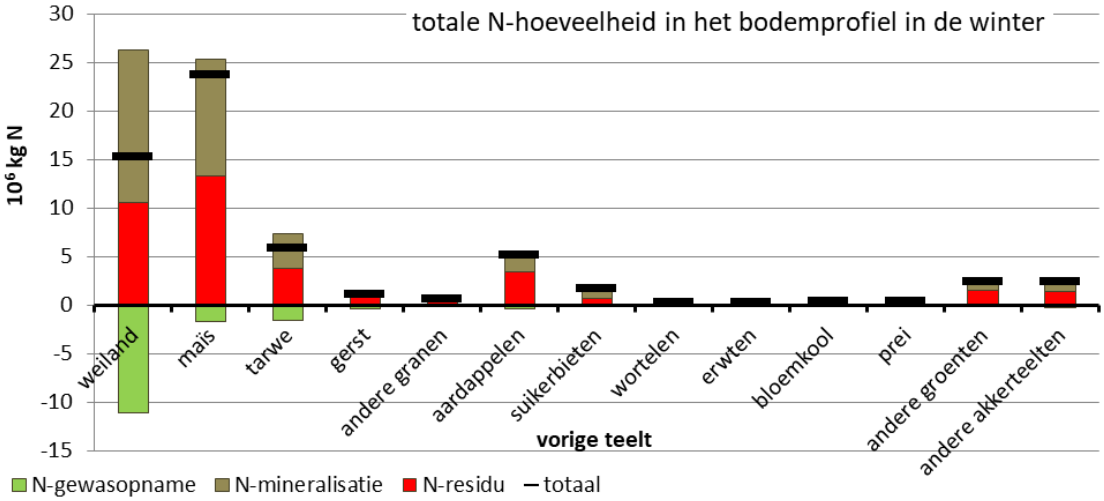
De totale hoeveelheid stikstof in het bodemprofiel tijdens de winter werd berekend als volgt:

N-residu - N-gewasopname tijdens de winter + N-mineralisatie tijdens de winter

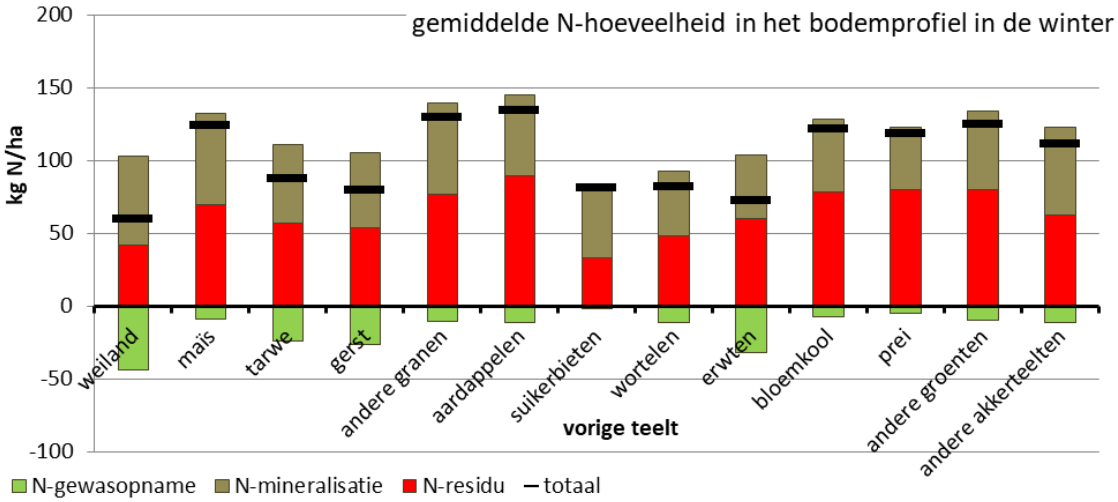
In Tabel 23 worden de resultaten van deze optelsom weergegeven op perceelsniveau, uitgaande van de berekende gemiddelde nitraatresidu's op basis van de EVANIR-dataset (zie Tabel 19). In Tabel 24 worden de resultaten van de optelsom weergegeven, uitgaande van de gemiddelde nitraatresidu's op basis van de VLM-dataset (zie Tabel 20).

In Tabel 25 en Tabel 26 worden de overeenkomstige totale hoeveelheden per bodemtextuurklasse (landbouwstreek) weergegeven.

In Figuur 31 en Figuur 32 worden de totale N-hoeveelheden in Vlaanderen en de gemiddelde N-hoeveelheden in het bodemprofiel tijdens de winter weergegeven per teeltgroep. De cijfers in deze figuren zijn gebaseerd op de nitraatresidu's van de VLM-dataset.



Figuur 31: Totale N-hoeveelheid in het bodemprofiel tijdens de winter per teeltgroep voor Vlaanderen, o.b.v. de nitraatresidu-gegevens van de VLM-databank



Figuur 32: Gemiddelde N-hoeveelheid in het bodemprofiel in de winter per teeltgroep, o.b.v. de nitraatresidu-gegevens van de VLM-databank

Tabel 23: Gemiddelde stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) op perceelsniveau tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal
	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
weiland	6,71	6,38	8,50	8,83	3,18	3,18	4,26	4,25	0,66	0,61	0,62	0,67	1,62	0,97	2,35	3,00	12,16	11,14	15,73	16,74
maïs	12,74	1,30	7,70	19,14	4,17	0,35	3,33	7,15	0,64	0,04	0,38	0,99	0,55	0,00	0,67	1,21	18,10	1,69	12,08	28,49
tarwe	0,53	0,18	0,44	0,78	1,73	0,74	1,49	2,48	0,85	0,37	0,58	1,05	1,17	0,30	1,05	1,92	4,27	1,59	3,56	6,24
gerst	0,23	0,08	0,16	0,31	0,28	0,19	0,30	0,39	0,12	0,07	0,11	0,16	0,09	0,02	0,13	0,21	0,73	0,36	0,70	1,07
andere granen	0,06	0,01	0,20	0,25	0,06	0,03	0,06	0,10	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,04	0,27	0,37
aardappelen	1,28	0,12	0,82	1,98	1,76	0,23	0,92	2,45	0,46	0,05	0,16	0,57	0,30	0,04	0,19	0,45	3,79	0,44	2,09	5,45
suikerbieten	0,08	0,00	0,11	0,19	0,27	0,01	0,40	0,66	0,20	0,01	0,24	0,43	0,18	0,01	0,24	0,42	0,74	0,03	1,00	1,71
wortelen	0,15	0,02	0,06	0,19	0,06	0,01	0,05	0,09	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,03	0,12	0,31
erwten	0,06	0,02	0,03	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,09	0,12	0,19
bloemkool	0,08	0,01	0,04	0,12	0,15	0,01	0,10	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,25	0,02	0,15	0,38
prei	0,11	0,01	0,06	0,16	0,14	0,00	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,01	0,13	0,37
andere groenten	0,73	0,07	0,41	1,07	0,80	0,04	0,44	1,20	0,11	0,01	0,06	0,16	0,20	0,05	0,08	0,23	1,84	0,18	0,99	2,66
andere akkerteelten	0,59	0,05	0,62	1,16	0,49	0,05	0,42	0,86	0,14	0,02	0,07	0,19	0,21	0,12	0,18	0,27	1,44	0,24	1,29	2,49
totaal	23,36	8,26	19,15	34,25	13,13	4,90	11,91	20,15	3,27	1,21	2,28	4,34	4,33	1,51	4,90	7,72	44,09	15,87	38,24	66,45

Tabel 24: Gemiddelde stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) op perceelsniveau tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal
	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
weiland	5,83	6,38	8,50	7,94	2,84	3,18	4,26	3,92	0,52	0,61	0,62	0,54	1,40	0,97	2,35	2,78	10,59	11,14	15,73	15,18
maïs	8,76	1,30	7,70	15,16	3,29	0,35	3,33	6,28	0,55	0,04	0,38	0,90	0,67	0,00	0,67	1,34	13,28	1,69	12,08	23,67
tarwe	0,42	0,18	0,44	0,68	1,54	0,74	1,49	2,29	0,69	0,37	0,58	0,89	1,15	0,30	1,05	1,90	3,80	1,59	3,56	5,76
gerst	0,18	0,08	0,16	0,26	0,28	0,19	0,30	0,39	0,14	0,07	0,11	0,18	0,14	0,02	0,13	0,26	0,74	0,36	0,70	1,08
andere granen	0,25	0,01	0,20	0,44	0,07	0,03	0,06	0,11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,04	0,27	0,56
aardappelen	1,12	0,12	0,82	1,82	1,62	0,23	0,92	2,31	0,38	0,05	0,16	0,49	0,27	0,04	0,19	0,42	3,38	0,44	2,09	5,04
suikerbieten	0,09	0,00	0,11	0,20	0,24	0,01	0,40	0,63	0,19	0,01	0,24	0,42	0,16	0,01	0,24	0,39	0,68	0,03	1,00	1,64
wortelen	0,06	0,02	0,06	0,10	0,06	0,01	0,05	0,10	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,03	0,12	0,22
erwten	0,07	0,02	0,03	0,08	0,07	0,05	0,06	0,08	0,03	0,03	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,09	0,12	0,20
bloemkool	0,08	0,01	0,04	0,12	0,14	0,01	0,10	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,23	0,02	0,15	0,36
prei	0,10	0,01	0,06	0,14	0,14	0,00	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01	0,13	0,35
andere groenten	0,64	0,07	0,41	0,99	0,63	0,04	0,44	1,03	0,10	0,01	0,06	0,15	0,10	0,05	0,08	0,13	1,48	0,18	0,99	2,30
andere akkerteelten	0,55	0,05	0,62	1,12	0,49	0,05	0,42	0,85	0,09	0,02	0,07	0,14	0,21	0,12	0,18	0,27	1,34	0,24	1,29	2,39
totaal	18,14	8,26	19,15	29,04	11,40	4,90	11,91	18,42	2,72	1,21	2,28	3,79	4,12	1,51	4,90	7,51	36,38	15,87	38,24	58,75

Tabel 25: Totale stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	6,71	6,38	8,50	8,83	3,18	3,18	4,26	4,25	0,66	0,61	0,62	0,67	1,62	0,97	2,35	3,00	12,16	11,14	15,73	16,74
maïs	12,74	1,30	7,70	19,14	4,17	0,35	3,33	7,15	0,64	0,04	0,38	0,99	0,55	0,00	0,67	1,21	18,10	1,69	12,08	28,49
tarwe	0,53	0,18	0,44	0,78	1,73	0,74	1,49	2,48	0,85	0,37	0,58	1,05	1,17	0,30	1,05	1,92	4,27	1,59	3,56	6,24
gerst	0,23	0,08	0,16	0,31	0,28	0,19	0,30	0,39	0,12	0,07	0,11	0,16	0,09	0,02	0,13	0,21	0,73	0,36	0,70	1,07
andere granen	0,06	0,01	0,20	0,25	0,06	0,03	0,06	0,10	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,04	0,27	0,37
aardappelen	1,28	0,12	0,82	1,98	1,76	0,23	0,92	2,45	0,46	0,05	0,16	0,57	0,30	0,04	0,19	0,45	3,79	0,44	2,09	5,45
suikerbieten	0,08	0,00	0,11	0,19	0,27	0,01	0,40	0,66	0,20	0,01	0,24	0,43	0,18	0,01	0,24	0,42	0,74	0,03	1,00	1,71
wortelen	0,15	0,02	0,06	0,19	0,06	0,01	0,05	0,09	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,03	0,12	0,31
erwten	0,06	0,02	0,03	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,09	0,12	0,19
bloemkool	0,08	0,01	0,04	0,12	0,15	0,01	0,10	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,25	0,02	0,15	0,38
prei	0,11	0,01	0,06	0,16	0,14	0,00	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,01	0,13	0,37
andere groenten	0,73	0,07	0,41	1,07	0,80	0,04	0,44	1,20	0,11	0,01	0,06	0,16	0,20	0,05	0,08	0,23	1,84	0,18	0,99	2,66
andere akkerteelten	0,59	0,05	0,62	1,16	0,49	0,05	0,42	0,86	0,14	0,02	0,07	0,19	0,21	0,12	0,18	0,27	1,44	0,24	1,29	2,49
totaal	23,36	8,26	19,15	34,25	13,13	4,90	11,91	20,15	3,27	1,21	2,28	4,34	4,33	1,51	4,90	7,72	44,09	15,87	38,24	66,45

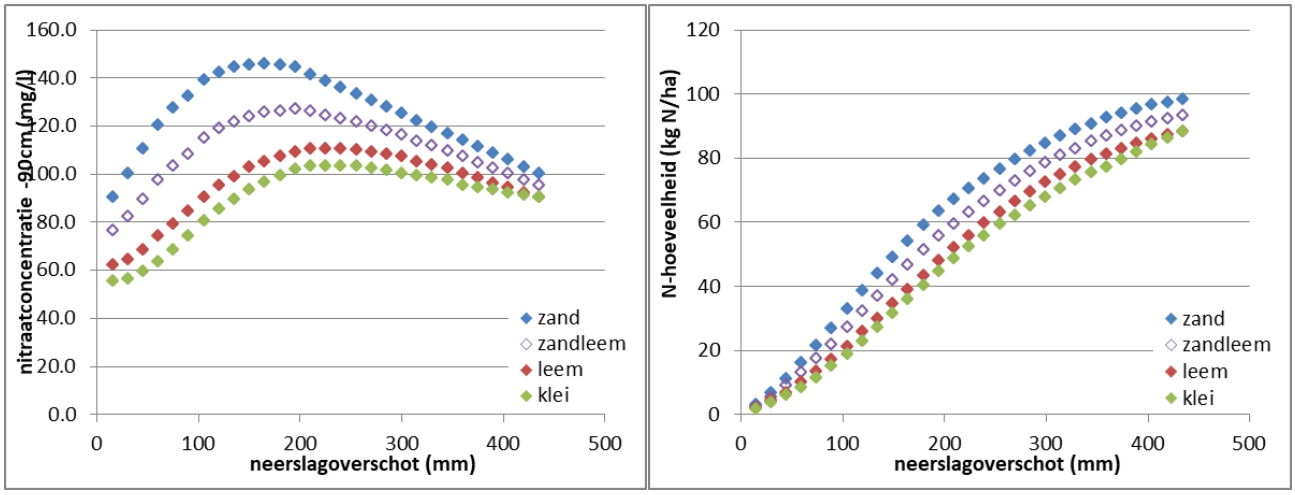
Tabel 26: Totale stikstofhoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel (90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal	residu	op-name	minera-lisatie	totaal
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5,83	6,38	8,50	7,94	2,84	3,18	4,26	3,92	0,52	0,61	0,62	0,54	1,40	0,97	2,35	2,78	10,59	11,14	15,73	15,18
maïs	8,76	1,30	7,70	15,16	3,29	0,35	3,33	6,28	0,55	0,04	0,38	0,90	0,67	0,00	0,67	1,34	13,28	1,69	12,08	23,67
tarwe	0,42	0,18	0,44	0,68	1,54	0,74	1,49	2,29	0,69	0,37	0,58	0,89	1,15	0,30	1,05	1,90	3,80	1,59	3,56	5,76
gerst	0,18	0,08	0,16	0,26	0,28	0,19	0,30	0,39	0,14	0,07	0,11	0,18	0,14	0,02	0,13	0,26	0,74	0,36	0,70	1,08
andere granen	0,25	0,01	0,20	0,44	0,07	0,03	0,06	0,11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,04	0,27	0,56
aardappelen	1,12	0,12	0,82	1,82	1,62	0,23	0,92	2,31	0,38	0,05	0,16	0,49	0,27	0,04	0,19	0,42	3,38	0,44	2,09	5,04
suikerbieten	0,09	0,00	0,11	0,20	0,24	0,01	0,40	0,63	0,19	0,01	0,24	0,42	0,16	0,01	0,24	0,39	0,68	0,03	1,00	1,64
wortelen	0,06	0,02	0,06	0,10	0,06	0,01	0,05	0,10	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,03	0,12	0,22
erwten	0,07	0,02	0,03	0,08	0,07	0,05	0,06	0,08	0,03	0,03	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,09	0,12	0,20
bloemkool	0,08	0,01	0,04	0,12	0,14	0,01	0,10	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,23	0,02	0,15	0,36
prei	0,10	0,01	0,06	0,14	0,14	0,00	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01	0,13	0,35
andere groenten	0,64	0,07	0,41	0,99	0,63	0,04	0,44	1,03	0,10	0,01	0,06	0,15	0,10	0,05	0,08	0,13	1,48	0,18	0,99	2,30
andere akkerteelten	0,55	0,05	0,62	1,12	0,49	0,05	0,42	0,85	0,09	0,02	0,07	0,14	0,21	0,12	0,18	0,27	1,34	0,24	1,29	2,39
totaal	18,14	8,26	19,15	29,04	11,40	4,90	11,91	18,42	2,72	1,21	2,28	3,79	4,12	1,51	4,90	7,51	36,38	15,87	38,24	58,75

5.5.4 Berekening van de hoeveelheid nitraat-N die verder uitspoelt naar het grondwater

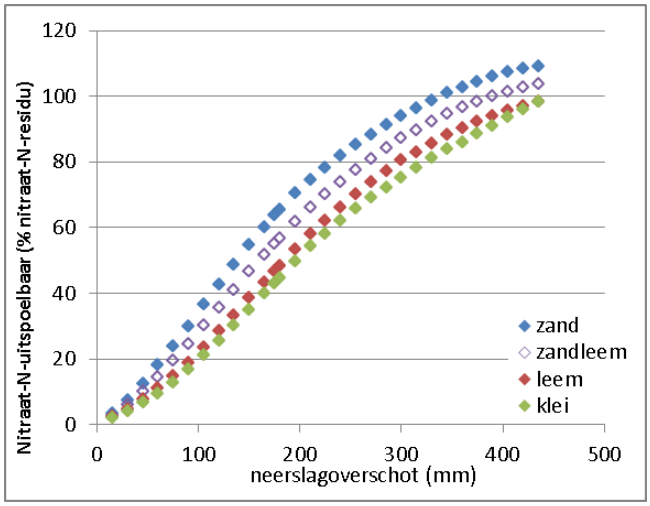
In de tweede stap werd, op basis van de N-hoeveelheid aanwezig in het bodemprofiel tijdens de winter (berekend in 5.5.3), geschat hoeveel nitraat-N tijdens de winter migreert tot onderaan de wortelzone (en dus kan uitspoelen naar het grondwater). Hierbij werd gebruik gemaakt van de resultaten van het analytisch uitspoelingsmodel dat ontwikkeld en gebruikt werd in de procesfactorstudie (Van Overtveld et al., 2011). Met dit model werden de nitraatconcentraties op -90 cm diepte berekend in functie van het neerslagoverschot (tussen 1 november en 31 maart) voor 3 bodemtypes (zand, leem, klei), een nitraat-N-hoeveelheid in het bodemprofiel tot 90 cm (nitraatresidu) van 90 kg N/ha en een grondwatertafel op -200 cm beneden maaiveld (zie Figuur 31). Voor de huidige studie werd voor de percelen in zandleemgronden een gemiddelde curve van zand en leem berekend. Verder werd er abstractie gemaakt van het effect van de diepte van de grondwatertafel en van de verdeling van de nitraatresidu's over de 3 bodemlagen.

Op basis van de grootte van het neerslagoverschot (l/ha) werden de door het model berekende N-concentraties omgerekend naar kg nitraat-N/ha die onderaan de wortelzone terechtkomt.

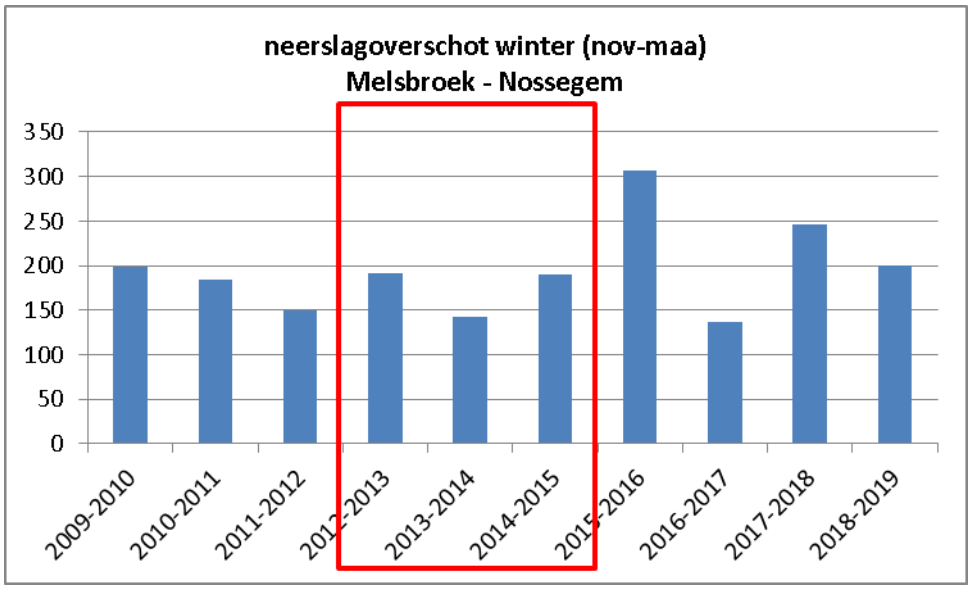


Figuur 33: Berekening van de nitraatconcentratie (links) en de overeenkomstige N-hoeveelheid (rechts) onderaan de wortelzone (-90 cm diepte), in functie van het neerslagoverschot met behulp van een analytisch uitspoelingsmodel, op basis van een N-hoeveelheid van 90 kg N/ha in het bodemprofiel (0-90cm) tijdens de winter en een grondwatertafel op -200 cm beneden maaiveld (Van Overtveld et al., 2011)

In Figuur 32 worden de nitraat-N-hoeveelheden onderaan de wortelzone (= uitspoelbare nitraat-N) uitgedrukt in % van de aanwezige nitraat-N in het bodemprofiel door de berekende hoeveelheden te delen door 90.



Figuur 34: Berekende hoeveelheid nitraat-N onderaan de wortelzone (uitspoelbaar) in % van de N-hoeveelheid in het bodemprofiel (0-90 cm) tijdens de winter



Figuur 35: Neerslagoverschot in de winter (1 november tot 31 maart) volgend op de meting van de nitraatresidu's van 2011 tot en met 2018; de rode kader geeft de gegevens van 2012 t/m 2014 aan (bron: Metagri Melsbroek en VMM waterinfo Nossegem)

Voor de jaren 202, 2013 en 2014 werd een gemiddeld neerslagoverschot van 175 mm berekend (zie Figuur 33). Dit komt overeen met nitraat-N-percentages van 63.8, 55.3, 46.7 en 43.2% van de N-hoeveelheid in het bodemprofiel voor respectievelijk zand-, zandleem-, leem- en kleigronden. De berekende hoeveelheden onderaan de wortelzone per teeltgroep*bodemtextuurklasse, uitgedrukt in kg N/ha, worden weergegeven in Tabel 25 (o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset, zie Tabel 19) en in Tabel 26 (o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset, zie Tabel 20).

Om de hoeveelheden nitraat-N die uiteindelijk in het grondwater terechtkomen te schatten dienden deze hoeveelheden nog gedeeld te worden door de mediane procesfactor voor Vlaanderen (= 2,1, zie Van Overtveld et al., 2011).

Op deze manier werd voor Vlaanderen berekend dat, tijdens de winter en voor de opgegeven teeltgroepen (96% van het areaal cultuurgrond), in totaal 38,4 miljoen kg N (o.b.v. de EVANIR-dataset) of 33,8 miljoen kg N (o.b.v. de VLM-dataset) onderaan de wortelzone terechtkomt en kan uitspoelen naar het grondwater. Ter vergelijking werd met het NEMO-model voor 2014 een totale nitraatpercolatie uit de onverzadigde zone berekend van 48,8 miljoen kg N (cijfers van NEMO versie 3.1 zoals aangeleverd door de Vlaamse Milieumaatschappij in 2019). Dit laatste cijfer betreft weliswaar de totale nitraatpercolatie voor het ganse jaar, terwijl in huidige studie enkele de doorspoeling tijdens de winter (van november tot maart) berekend wordt.

VLAAMSE
LAND
MAATSCHAPPIJ

Tabel 27: Gemiddelde stikstofhoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de EVANIR-dataset (zie Tabel 19)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm	
	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N
weiland	146277	60	38	5,63	72939	58	32	2,35	13960	48	22	0,31	22164	135	58	1,29	255340	66	38	9,59
maïs	115631	166	106	12,21	56179	127	70	3,95	9719	101	47	0,46	9988	121	52	0,52	191517	149	90	17,15
tarwe	7593	103	66	0,50	27607	90	50	1,37	15250	69	32	0,49	15995	120	52	0,83	66444	94	48	3,19
gerst	2366	129	83	0,20	6199	63	35	0,22	3127	50	24	0,07	1975	106	46	0,09	13667	78	42	0,58
andere granen	2650	95	61	0,16	1204	84	47	0,06	241	67	31	0,01	250			0,00	4346	85	52	0,22
aardappelen	12848	154	99	1,27	17564	139	77	1,35	4217	135	63	0,27	3100	144	62	0,19	37729	144	82	3,08
suikerbieten	1933	101	64	0,12	8566	77	43	0,37	6481	67	31	0,20	3392	123	53	0,18	20372	84	43	0,87
wortelen	1319	146	93	0,12	1053	89	49	0,05	351	71	33	0,01	9			0,00	2733	114	68	0,19
erwten	482	142	91	0,04	1142	49	27	0,03	866	76	35	0,03	330			0,00	2820	67	37	0,11
bloemkool	967	122	78	0,08	1941	124	69	0,13	40	87	40	0,00	45	325	140	0,01	2993	126	72	0,22
prei	1230	127	81	0,10	1699	121	67	0,11	13	151	70	0,00	18	43	18	0,00	2961	123	72	0,22
andere groenten	5994	178	114	0,68	9626	125	69	0,67	1625	100	47	0,08	1215	188	81	0,10	18460	144	82	1,52
andere akkerteelten	9294	125	80	0,74	7381	117	64	0,48	1939	100	47	0,09	2873	95	41	0,12	21486	116	66	1,42
totaal	308584	111	74	21,85	213101	95	51	11,14	57830	75	44	2,03	61353	126	72	3,33	640868	104	60	38,35
/ procesfactor 2,1				10,41				5,31				0,96				1,59				18,26

Tabel 28: Gemiddelde stikstofhoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. nitraatresidu's berekend uit de VLM-dataset (zie Tabel 20)

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				Zandleem (Zandleemstreek)				Leem (Leemstreek+Weidestreek)				Klei (Polders)				Vlaanderen			
	areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm		areaal	N in profiel	N onderaan wortelzone -90 cm	
	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N	ha	kg N/ha	kg N/ha	10^6 kg N
weiland	146277	54	35	5,07	72939	54	30	2,17	13960	38	19	0,25	22164	126	55	1,20	255340	59	34	8,69
maïs	115631	131	84	9,67	56179	112	62	3,47	9719	92	43	0,42	9988	134	58	0,58	191517	124	74	14,14
tarwe	7593	89	57	0,43	27607	83	46	1,27	15250	59	28	0,42	15995	119	52	0,82	66444	87	44	2,94
gerst	2366	109	71	0,17	6199	62	34	0,21	3127	56	27	0,08	1975	130	56	0,11	13667	79	42	0,57
andere granen	2650	165	106	0,28	1204	90	50	0,06	241	62	29	0,01	250	0	0	0,00	4346	129	80	0,35
aardappelen	12848	142	90	1,16	17564	132	73	1,28	4217	116	54	0,23	3100	134	58	0,18	37729	133	75	2,85
suikerbieten	1933	102	65	0,13	8566	74	41	0,35	6481	65	30	0,20	3392	116	50	0,17	20372	81	41	0,84
wortelen	1319	77	49	0,06	1053	93	52	0,05	351	64	30	0,01	9	0	0	0,00	2733	82	48	0,13
erwten	482	160	102	0,05	1142	74	41	0,05	866	47	22	0,02	330	0	0	0,00	2820	72	41	0,12
bloemkool	967	125	80	0,08	1941	116	64	0,12	40	22	10	0,00	45	355	153	0,01	2993	121	70	0,21
prei	1230	111	71	0,09	1699	125	69	0,12	13	46	21	0,00	18	31	13	0,00	2961	118	69	0,20
andere groenten	5994	165	105	0,63	9626	107	59	0,57	1625	93	44	0,07	1215	107	46	0,06	18460	125	72	1,33
andere akkerteelten	9294	121	78	0,72	7381	115	64	0,47	1939	74	35	0,07	2873	94	41	0,12	21486	111	64	1,37
totaal	308584	94	60	18,53	213101	86	48	10,18	57830	65	31	1,77	61353	122	53	3,24	640868	92	53	33,72
/ procesfactor 2,1				8,82				4,85				0,84				1,54				16,06

5.5.5 Output - leverbaarheden

L9:

- Eenvoudige en pragmatische rekenalgoritmes voor de berekening van de N-uitspoeling tijdens de winter, vertrekkend van het nitraatresidu: zie 5.5.1 en 5.5.3.
- Invloed van de bodem-pH: zie 5.6.1.

L10: Theoretische N-uitspoeling tijdens de winter uit landbouwpercelen in Vlaanderen in de huidige situatie: zie 5.5.4.

5.6 STAP 5: THEORETISCHE BEREKENING N-UITSPOELING TIJDENS DE WINTER UIT LANDBOUWPERCELEN IN VLAANDEREN, "IDEALE" SITUATIE PH

5.6.1 Aanpak

De "optimale" pH werd per perceel bepaald i.f.v. de bodemtextuur en het organische-C-gehalte, o.b.v. de streefzones en evaluatieklassen uit Onderdeel 1 (cfr. L1), voor de percelen van de dataset gebruikt in Stap 4 (zie 5.5.2.1).

Voor elk van deze percelen werd vervolgens een theoretisch nitraatresidu berekend in een optimale pH-situatie. Hiervoor werden 2 benaderingen toegepast.

In een eerste benadering werden de statistische verbanden tussen de pH en het nitraatresidu die gevonden werden in Stap 3 (cfr. L8) toegepast. De nitraatresidu's bij optimale pH werden berekend volgens een eenvoudige lineaire regressie (op de log-getransformeerde nitraatresidu's), afgeleid uit de resultaten van de statistische analyse (zie 5.4.6).

Voor de akkerpercelen werd een regressiecoëfficiënt van -0,03 toegepast op het pH-tekort, d.i. het verschil tussen de optimale pH (pH_{opt}) en de actuele pH (pH_{act}) indien de optimale pH groter is dan de actuele pH.

$$Nres\_t(pH_{opt}) = Nres\_t(pH_{act}) - 0{,}03 * \text{pH-tekort}$$

Deze regressiecoëfficiënt werd gekozen op basis van de besluiten uit stap 3 (zie 5.4.8):

- er is een overwegend negatief effect van de pH op het nitraatresidu voor akkerpercelen met sub-optimale pH (d.w.z. dat het nitraatresidu daalt bij stijgende pH),
- de statistisch significante regressiecoëfficiënten (log-getransformeerde nitraatresidu's) variëren tussen -0,02 en -0,15,
- de mixed-model-analyses geven enkel voor maïs een significant enkelvoudig effect aan op het log-getransformeerd nitraatresidu, met een coëfficiënt van 0,03, d.w.z. binnen de range van deze van de lineraire regressies.

Vermits maïs de belangrijkste akkerteeltgroep in Vlaanderen vertegenwoordigt, zowel naar areaal als naar nitraatresidu-niveau's, werd de coëfficiënt van -0,03 als de meest betrouwbare beschouwd voor toepassing in de huidige studie.

Voor de weilandpercelen werd de verbetering van het nitraatresidu door optimaliseren van de pH in deze benadering als verwaarloosbaar beschouwd. Dit wordt gestaafd enerzijds door de wisselende en zelfs positieve regressiecoëfficiënten voor N-residu i.f.v. pH die gevonden werden voor weiland (zie 5.4.8) en anderzijds door de relatief kleine regressiecoëfficiënten voor N-opname door gras i.f.v. de pH (zie 5.3.3).

De tweede benadering was een zeer optimistische benadering, waarbij gebruik gemaakt werd van de pH-gewasresponscurves die afgeleid werden in Stap 2 (zie 5.3.3). De N-opname (kg N/ha/jaar) per perceel werd berekend volgens de gemiddelde N-opname per teeltgroep (Tabel 6) en in functie van de pH volgens de gewas-responscurves (Tabel 9). Dit gebeurde zowel in de "huidige" situatie (volgens de gemeten pH) als in de "optimale" situatie (met optimale pH). Voor de percelen met een huidige sub-optimale pH werd een verhoging van de gewas-N-opname in de optimale-pH-situatie berekend. Deze verhoogde opname door het gewas werd volledig in mindering gebracht van het nitraatresidu.

In beide benaderingen werd tenslotte de overeenkomstige theoretische nitraatuitspoeling afgeleid met de rekenalgoritmes uit Stap 4 (cfr. L9).

5.6.2 N-residu bij optimale pH

In Tabel 27 en Tabel 28 worden de nitraatresidu's voorgesteld, berekend op basis van de EVANIR-dataset, uitgedrukt in kg N/ha (Tabel 27) en in kg N totaal (Tabel 28), zoals ze berekend werden voor de 3 verschillende pH-scenario's:

- "huidige" pH-situatie
- "optimale" pH-situatie, berekening effect op nitraatresidu volgens benadering 1 (#1)
- "optimale" pH-situatie, berekening effect op nitraatresidu volgens benadering 2 (#2)

In Tabel 29 en Tabel 30 worden dezelfde berekening voorgesteld, maar dan op basis van de VLM-dataset.

In de eerste benadering wordt in totaal een daling van het nitraatresidu bij optimale pH berekend van 2,5% en 2,4% (resp. op basis van de EVANIR- en de VLM-dataset). In de tweede, optimistische benadering daalt het nitraatresidu met resp. 22,6% en 20,1%.

Tabel 29: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
weiland	46	46	39	44	44	36	47	47	39	73	73	71	48	48	42
maïs	110	106	72	74	71	54	66	62	48	55	53	51	95	91	64
tarwe	69	67	36	63	61	49	56	53	39	73	71	69	60	57	43
gerst	96	92	69	46	45	40	38	36	30	47	46	46	50	48	39
andere granen	24	23	9	53	53	53	57	54	47				43	41	31
aardappelen	100	96	78	100	98	93	109	103	91	96	92	95	106	101	89
suikerbieten	44	43	31	32	32	29	31	29	19	54	53	49	37	36	26
wortelen	115	112	104	53	51	36	36	35	28				50	49	38
erwten	125	124	125	33	33	32	68	66	67				77	75	76
bloemkool	84	82	61	79	78	69	64	61	51	285	279	281	83	80	70
prei	93	91	76	80	78	64	116	111	104	12	11	0	102	98	88
andere groenten	121	119	101	83	81	73	70	67	63	166	151	152	84	81	73
andere akkerteelten	64	62	39	67	64	47	71	67	56	75	71	69	68	65	50
totaal	76	74	55	62	60	50	57	54	43	71	69	67	69	67	53

Tabel 30: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het totaal nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	6,71	6,71	5,75	3,18	3,18	2,62	0,66	0,66	0,55	1,62	1,62	1,57	12,16	12,16	10,49
maïs	12,74	12,31	8,34	4,17	3,97	3,02	0,64	0,61	0,46	0,55	0,53	0,51	18,10	17,42	12,33
tarwe	0,53	0,51	0,27	1,73	1,68	1,36	0,85	0,81	0,59	1,17	1,14	1,11	4,27	4,14	3,34
gerst	0,23	0,22	0,16	0,28	0,28	0,25	0,12	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,73	0,70	0,60
andere granen	0,06	0,06	0,02	0,06	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,14	0,14	0,10
aardappelen	1,28	1,24	1,00	1,76	1,73	1,63	0,46	0,43	0,38	0,30	0,29	0,30	3,79	3,68	3,31
suikerbieten	0,08	0,08	0,06	0,27	0,27	0,24	0,20	0,19	0,13	0,18	0,18	0,17	0,74	0,73	0,60
wortelen	0,15	0,15	0,14	0,06	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,22	0,21	0,19
erwten	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,16	0,15	0,16
bloemkool	0,08	0,08	0,06	0,15	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,25	0,25	0,21
prei	0,11	0,11	0,09	0,14	0,13	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,20
andere groenten	0,73	0,71	0,60	0,80	0,78	0,70	0,11	0,11	0,10	0,20	0,18	0,18	1,84	1,78	1,59
andere akkerteelten	0,59	0,58	0,37	0,49	0,47	0,34	0,14	0,13	0,11	0,21	0,20	0,20	1,44	1,38	1,02
totaal	23,36	22,81	16,93	13,13	12,80	10,55	3,27	3,14	2,50	4,33	4,24	4,14	44,09	43,00	34,12

Tabel 31: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het gemiddeld nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-nitraatresidu-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
weiland	40	40	34	39	39	32	37	37	31	63	63	62	41	41	35
maïs	76	73	50	59	56	43	57	54	41	67	65	62	69	66	47
tarwe	55	53	29	56	54	44	45	43	32	72	70	68	55	53	39
gerst	76	73	54	45	44	39	44	42	35	71	69	69	52	49	40
andere granen	95	90	36	59	59	59	52	50	43				85	81	62
aardappelen	87	84	68	92	91	86	90	85	75	86	83	85	90	86	76
suikerbieten	45	44	31	28	28	25	29	28	18	47	46	43	32	32	23
wortelen	46	45	42	57	55	39	30	29	23				50	49	38
erwten	143	142	143	58	57	57	39	38	38				91	89	90
bloemkool	87	85	64	70	70	62				315	309	310	79	77	67
prei	77	76	63	83	81	66	11	10	10				80	77	69
andere groenten	107	105	89	65	63	57	64	61	57	85	78	78	78	76	68
andere akkerteelten	59	58	37	66	63	46	46	43	35	74	70	69	62	59	45
totaal	59	57	43	54	52	43	47	45	36	67	66	64	57	55	44

Tabel 32: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op het totaal nitraatresidu per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-nitraatresidu-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5,83	5,83	4,99	2,84	2,84	2,34	0,52	0,52	0,43	1,40	1,40	1,37	10,59	10,59	9,14
maïs	8,76	8,46	5,74	3,29	3,14	2,39	0,55	0,52	0,40	0,67	0,65	0,62	13,28	12,78	9,05
tarwe	0,42	0,40	0,22	1,54	1,49	1,21	0,69	0,66	0,48	1,15	1,12	1,09	3,80	3,67	2,96
gerst	0,18	0,17	0,13	0,28	0,27	0,24	0,14	0,13	0,11	0,14	0,14	0,14	0,74	0,71	0,60
andere granen	0,25	0,24	0,10	0,07	0,07	0,07	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,33	0,33	0,24
aardappelen	1,12	1,08	0,87	1,62	1,59	1,51	0,38	0,36	0,32	0,27	0,26	0,26	3,38	3,29	2,95
suikerbieten	0,09	0,09	0,06	0,24	0,24	0,22	0,19	0,18	0,12	0,16	0,16	0,14	0,68	0,66	0,54
wortelen	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,13	1,28	0,11
erwten	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,17	1,66	0,17
bloemkool	0,08	0,08	0,06	0,14	0,14	0,12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,23	0,23	0,20
prei	0,10	0,09	0,08	0,14	0,14	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,23	0,19
andere groenten	0,64	0,63	0,54	0,63	0,61	0,55	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	1,48	1,43	1,28
andere akkerteelten	0,55	0,54	0,34	0,49	0,47	0,34	0,09	0,08	0,07	0,21	0,20	0,20	1,34	1,29	0,95
totaal	18,14	17,74	13,25	11,40	11,12	9,20	2,72	2,61	2,07	4,12	4,04	3,93	36,38	35,51	28,38

5.6.3 N-uitspoeling bij optimale pH

In Tabel 31 worden de nitraat-N-hoeveelheden die migreren tot onderaan de wortelzone (-90 cm) voorgesteld, berekend op basis van de EVANIR-dataset, uitgedrukt in kg N totaal, zoals ze berekend werden voor de 3 verschillende pH-scenario's:

- "huidige" pH-situatie
- "optimale" pH-situatie, berekening effect op nitraatresidu volgens benadering 1 (#1)
- "optimale" pH-situatie, berekening effect op nitraatresidu volgens benadering 2 (#2)

In Tabel 32 wordt dezelfde berekening voorgesteld, maar dan op basis van de VLM- dataset.

In de eerste benadering werd in totaal een daling van de nitraat-N-hoeveelheden bij optimale pH berekend van 1,6% (EVANIR-dataset) of 1,5% (VLM-dataset). In de tweede, optimistische benadering daalde de nitraat-N-hoeveelheid met 15,6% (EVANIR-dataset) of 14,0% (VLM-dataset).

Tabel 33: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de EVANIR-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5,63	5,63	5,02	2,35	2,35	2,04	0,31	0,31	0,26	1,29	1,29	1,28	9,59	9,59	8,60
maïs	12,21	11,94	9,41	3,95	3,84	3,32	0,46	0,44	0,38	0,52	0,52	0,51	17,15	16,74	13,61
tarwe	0,50	0,49	0,34	1,37	1,34	1,17	0,49	0,47	0,37	0,83	0,82	0,80	3,19	3,12	2,68
gerst	0,20	0,19	0,15	0,22	0,22	0,20	0,07	0,07	0,06	0,09	0,09	0,09	0,58	0,56	0,50
andere granen	0,16	0,16	0,14	0,06	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,22	0,22	0,20
aardappelen	1,27	1,24	1,08	1,35	1,34	1,29	0,27	0,25	0,23	0,19	0,19	0,19	3,08	3,02	2,79
suikerbieten	0,12	0,12	0,11	0,37	0,37	0,35	0,20	0,20	0,17	0,18	0,18	0,17	0,87	0,87	0,80
wortelen	0,12	0,12	0,11	0,05	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,19	0,18	0,17
erwten	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,11	0,10	0,10
bloemkool	0,08	0,07	0,06	0,13	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,22	0,21	0,19
prei	0,10	0,10	0,09	0,11	0,11	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,21	0,19
andere groenten	0,68	0,67	0,60	0,67	0,65	0,61	0,08	0,07	0,07	0,10	0,09	0,09	1,52	1,49	1,37
andere akkerteelten	0,74	0,73	0,60	0,48	0,46	0,39	0,09	0,09	0,08	0,12	0,11	0,11	1,42	1,40	1,18
totaal	21,85	21,50	17,75	11,14	10,96	9,72	2,03	1,97	1,67	3,33	3,30	3,25	38,35	37,72	32,39
/ procesfactor 2,1	10,41	10,24	8,45	5,31	5,22	4,63	0,96	0,94	0,79	1,59	1,57	1,55	18,26	17,96	15,42

Tabel 34: Effect van de optimalisatie van de bodem-pH op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter per teeltgroep en bodemtextuurklasse, volgens 2 benaderingen (#1 en #2), o.b.v. de VLM-dataset

Teeltgroep	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)			Zandleem (Zandleemstreek)			Leem (Leemstreek+Weidestreek)			Klei (Polders)			Vlaanderen		
	huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH		huidige situatie	optimale pH	
		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2		#1	#2
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5,07	5,07	4,54	2,17	2,17	1,89	0,25	0,25	0,21	1,20	1,20	1,19	8,69	8,69	7,82
maïs	9,67	9,49	7,74	3,47	3,38	2,97	0,42	0,40	0,35	0,58	0,57	0,55	14,14	13,84	11,62
tarwe	0,43	0,42	0,30	1,27	1,24	1,08	0,42	0,40	0,32	0,82	0,81	0,80	2,94	2,87	2,50
gerst	0,17	0,16	0,13	0,21	0,21	0,19	0,08	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11	0,57	0,56	0,50
andere granen	0,28	0,27	0,18	0,06	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,35	0,34	0,25
aardappelen	1,16	1,14	1,00	1,28	1,26	1,22	0,23	0,22	0,20	0,18	0,18	0,18	2,85	2,79	2,60
suikerbieten	0,13	0,12	0,11	0,35	0,35	0,33	0,20	0,19	0,16	0,17	0,17	0,16	0,84	0,83	0,77
wortelen	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,13	0,13	0,11
erwten	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,12	0,11	0,11
bloemkool	0,08	0,08	0,06	0,12	0,12	0,11	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,21	0,21	0,19
prei	0,09	0,09	0,08	0,12	0,12	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,20	0,18
andere groenten	0,63	0,62	0,56	0,57	0,56	0,52	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	1,33	1,30	1,20
andere akkerteelten	0,72	0,71	0,58	0,47	0,46	0,39	0,07	0,07	0,06	0,12	0,11	0,11	1,37	1,34	1,14
Totaal	18,53	18,27	15,40	10,18	10,03	8,97	1,77	1,72	1,47	3,24	3,21	3,16	33,72	33,23	29,00
/ procesfactor 2,1	8,82	8,70	7,33	4,85	4,78	4,27	0,84	0,82	0,70	1,54	1,53	1,50	16,06	15,82	13,81

5.6.4 Output - leverbaarheden

L11: Ideale situatie pH en N-residu in Vlaanderen: zie 5.6.2.

L12: Theoretische N-uitspoeling uit landbouwpercelen in Vlaanderen in een ideale situatie voor bodem-pH: zie 5.6.3

6 ONDERDEEL 3: AANBEVELINGEN VOOR IMPLEMENTATIE

In dit onderdeel worden aanbevelingen voor implementatie opgesteld.

Op basis van de resultaten van de vorige onderdelen wordt bekeken op welke manieren de pH van Vlaamse landbouwpercelen op een optimaal niveau kan worden gebracht, welke technische en andere aspecten hierbij van belang zijn, binnen welk tijdsinterval dit kan gebeuren en wat de kosten/baten voor de landbouwers zouden zijn.

6.1 TECHNISCHE ASPECTEN

Voor de technische aspecten van bekalking verwijzen we naar de literatuurstudie in Onderdeel 1 (zie 4.3) waarin o.a. de volgende aspecten worden behandeld:

- Bekalking in de praktijk: tijdstip, werkwijze, voor welke teelten, inpassen in de teeltrotatie, waarmee moet men rekening houden?
- Mogelijke producten, welk effect hebben ze, op welke termijn, welke producten zijn geschikt in welke omstandigheden?
- Keuze van andere (kunst)meststoffen rekening houdend met eventuele verzurende werking.

6.1.1 Output en leverbaarheden

L13: Beschrijving van de technische aspecten van een optimale bekalking: zie 4.3.

6.2 KOSTEN-BATENANALYSE - ECONOMISCHE WINST VOOR DE LANDBOUW

6.2.1 Aanpak

- De huidige jaarlijkse opbrengstderving op schaal Vlaanderen omwille van niet-optimale pH werd ingeschat o.b.v. Onderdeel 1 (invloed pH op gewasopbrengsten, cfr. L2) en Onderdeel 2, Stap 1 (huidige situatie pH in Vlaanderen, cfr. L5).
- Om de nodige bekalkingshoeveelheid in Vlaanderen te berekenen werd de huidige situatie van de pH in Vlaanderen (L5) vergeleken met de ideale situatie (opgesteld in Onderdeel 2, L11). Vervolgens werd berekend hoeveel bekalking er in Vlaanderen nodig is om deze ideale situatie te bereiken en wat de kostprijs hiervan zou zijn, op basis van een gemiddelde kostprijs van kalkproducten en de toediening ervan.

6.2.2 Huidige opbrengstderving op schaal Vlaanderen door sub-optimale pH

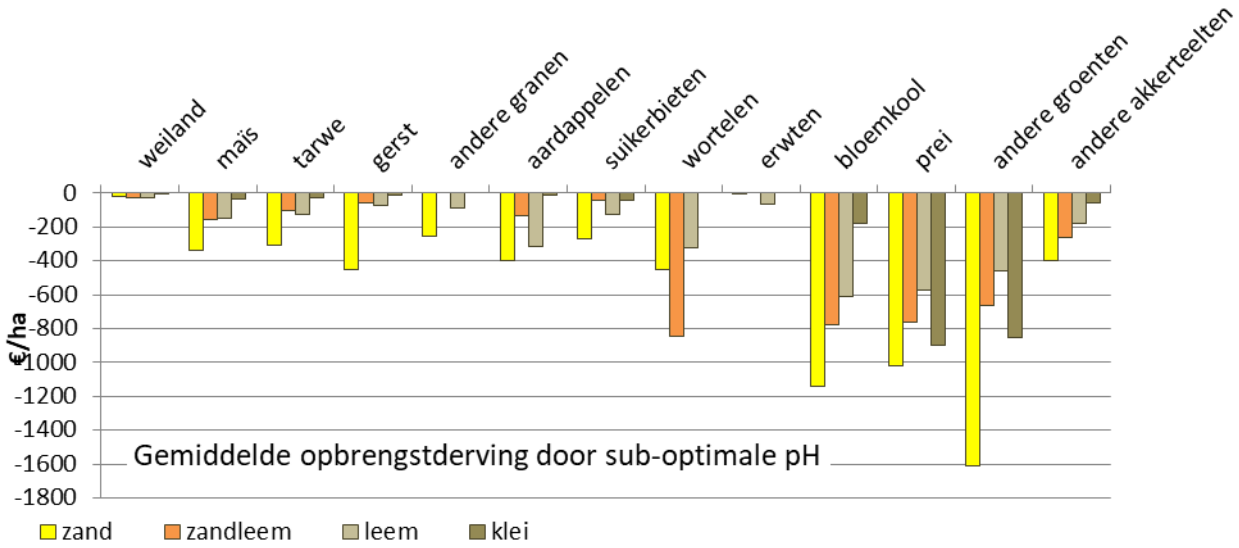
Gemiddelde opbrengsten per teeltgroep (Tabel 33) worden uitgedrukt in €/ha en zijn gebaseerd op de cijfers gebruikt in het project “Bemestingsvrije stroken” (Tits et al., 2018). Voor maïs werd het gemiddelde van snijmaïs en korrelmaïs genomen en voor de diverse groenten werd telkens het gemiddelde van “industrie” en “versmarkt” genomen.

Tabel 35: Gemiddelde “normale” opbrengsten per teeltgroep (bron: Tits et al., 2018)

Teeltgroep	Opbrengst (€/ha)
weiland	1320
maïs	1850
tarwe	1800
gerst	1500
andere granen	1650
aardappelen	5000
suikerbieten	2700
wortelen	8000
erwten	10100
bloemkool	10600
prei	11250
andere groenten	13768
andere akkerteelten	2643

De totale jaarlijkse opbrengstderving voor heel Vlaanderen werd geschat op 107 miljoen €, hetzij gemiddeld 167 €/ha (Tabel 34). De grootste totale opbrengstderving werd berekend voor maïs, gevolgd door groenten. Voor weiland waren de opbrengstdervingen zoals verwacht het laagst.

In Figuur 36 wordt de gemiddelde opbrengstderving door sub-optimale pH weergegeven per teeltgroep.

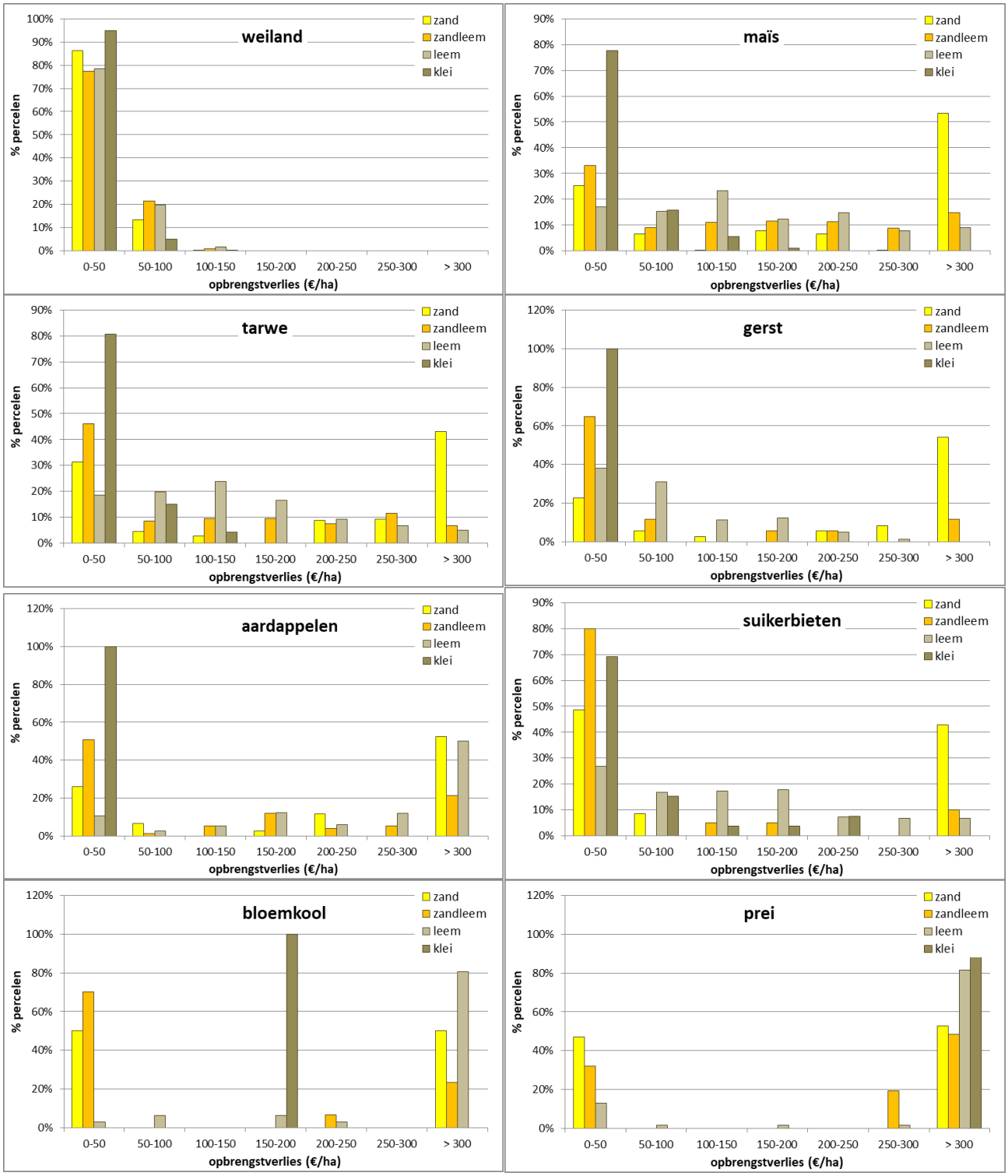


Figuur 36: Gemiddelde opbrengstderving door sub-optimale pH per teeltgroep in de "huidige" pH-situatie

In Figuur 37 worden de frequentieverdelingen van de opbrengstverliezen per teeltgroep voorgesteld. In meer dan 80% van de weilandpercelen en, met uitzondering van de groenten (bloemkool en prei) in de meeste akkerpercelen (met uitzondering van de groenten, bloemkool en prei) bedragen de verliezen minder dan 50 €/ha. Toch zijn er, vooral in de zandgronden, nog een substantieel aantal akkerpercelen met verliezen van meer dan 300 €/ha.

Tabel 36: Gemiddelde opbrengst bij huidige en bij optimale pH en gemiddelde en maximale jaarlijkse opbrengstderving door sub-optimale pH per teeltgroep en per bodemtextuurklasse

Teeltgroep	zand (Kempen+Vl.Zandstreek)				zandleem (Zandleemstreek)				leem (Leemstreek+Weidestreek)				klei (Polders)				Vlaanderen			
	Opbrengst		Opbrengst-derving		Opbrengst		Opbrengst-derving		Opbrengst		Opbrengst-derving		Opbrengst		Opbrengst-derving		Opbrengst		Opbrengst-derving	
	huidig	pH opt.	gemid.	totaal	huidig	pH opt.	gemid.	totaal	huidig	pH opt.	gemid.	totaal	huidig	pH opt.	gemid.	totaal	huidig	pH opt.	gemid.	totaal
	€/ha	€/ha	€/ha	10^6 €	€/ha	€/ha	€/ha	10^6 €	€/ha	€/ha	€/ha	10^6 €	€/ha	€/ha	€/ha	10^6 €	€/ha	€/ha	€/ha	10^6 €
weiland	1297	1320	-23	-3,31	1292	1320	-28	-2,03	1292	1320	-28	-0,39	1313	1320	-7	-0,15	1297	1320	-23	-5,88
maïs	1511	1850	-339	-39,22	1691	1850	-159	-8,93	1702	1850	-148	-1,43	1818	1850	-32	-0,32	1589	1850	-261	-49,90
tarwe	1490	1800	-310	-2,35	1695	1800	-105	-2,91	1673	1800	-127	-1,93	1776	1800	-24	-0,38	1686	1800	-114	-7,58
gerst	1048	1500	-452	-1,07	1445	1500	-55	-0,34	1427	1500	-73	-0,23	1489	1500	-11	-0,02	1379	1500	-121	-1,66
andere granen	1394	1650	-256	-0,68	1650	1650	0	0,00	1564	1650	-86	-0,02				0,00	1394	1555	-161	-0,70
aardappelen	4604	5000	-396	-5,08	4865	5000	-135	-2,36	4685	5000	-315	-1,33	4988	5000	-12	-0,04	4766	5000	-234	-8,81
suikerbieten	2427	2700	-273	-0,53	2658	2700	-42	-0,36	2574	2700	-126	-0,81	2655	2700	-45	-0,15	2609	2700	-91	-1,86
wortelen	7547	8000	-453	-0,60	7157	8000	-843	-0,89	7674	8000	-326	-0,11				0,00	7389	7974	-585	-1,60
erwten	10092	10100	-8	0,00	10100	10100	0	0,00	10033	10100	-67	-0,06				0,00	8897	8919	-22	-0,06
bloemkool	9460	10600	-1140	-1,10	9822	10600	-778	-1,51	9987	10600	-613	-0,02	10419	10600	-181	-0,01	9716	10600	-884	-2,64
prei	10230	11250	-1020	-1,25	10486	11250	-764	-1,30	10679	11250	-571	-0,01	10352	11250	-898	-0,02	10380	11250	-870	-2,58
andere groenten	12155	13768	-1613	-9,67	13104	13768	-664	-6,39	13311	13768	-457	-0,74	12912	13768	-855	-1,04	12801	13768	-966	-17,84
andere akkerteelten	2242	2643	-401	-3,73	2377	2643	-266	-1,96	2464	2643	-179	-0,35	2587	2643	-56	-0,16	2355	2643	-288	-6,20
totaal	1867	2089	-222	-68,60	2604	2740	-136	-28,98	2416	2545	-129	-7,44	2068	2105	-37	-2,28	2181	2348	-167	-107,31



Figuur 37: Frequentieverdeling van de opbrengstverliezen door sub-optimale pH, per teeltgroep en per bodemtextuurklasse

6.2.3 Nodige bekalkingshoeveelheid om alle percelen in Vlaanderen in de streefzone voor pH te brengen

De benodigde hoeveelheid kalk (uitgedrukt in zbw/ha) werd berekend voor elk perceel uit de EVANIR-dataset, met behulp van de rekenregels gehanteerd door Nutrinorm (o.a. Loman, 1977 en https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/_layouts/15/Nutrinorm.Internet.Branding/Print.aspx?listId=c6921504-7e12-4c67-9c02-d9c446ec94f1&itemId=362). Hierbij werd enkel rekening gehouden met de herstelbekalking die vereist is om de pH in de streefzone te brengen. De onderhoudsbekalking werd niet in rekening gebracht aangezien deze kan beschouwd worden als een normale praktijk, ook voor percelen met een pH in de streefzone (zie 4.3.1).

Ook al worden de resultaten voorgesteld per teeltgroep, de vereiste bekalking werd steeds berekend i.f.v. de pH-streefzone voor de ganse rotatie, onafhankelijk van de teelt die het voorbije jaar op het perceel stond. In de praktijk worden de bekalkingsadviezen ook opgesteld voor de volledige rotatie, maar wordt de aanbevolen globale dosis daarna opgesplitst en/of aangepast in functie van de teelt, zodat er bv. nooit een bekalking aanbevolen wordt vóór aardappelen. De opdeling in teeltgroepen werd gedaan om de resultaten op een analoge manier voor te stellen met de resultaten van de nitraatuitspoeling en de opbrengstderving.

De kostprijs van de bekalking werd berekend op basis van de volgende prijzen:

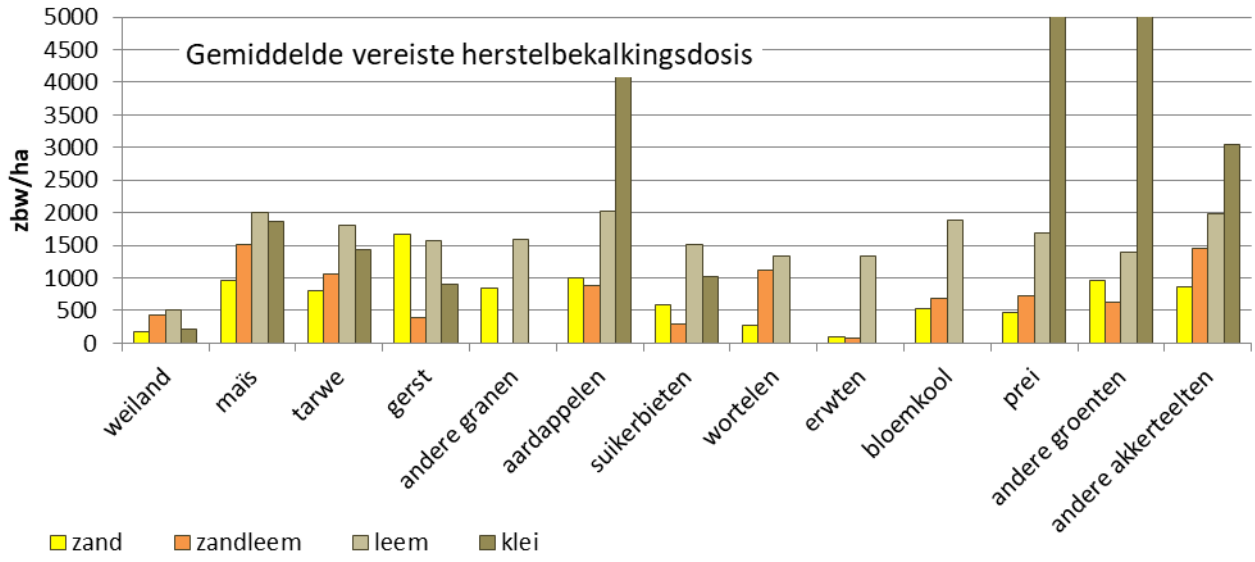
- Prijs product + toediening: 60 €/ton kalk
- Samenstelling product: 50% zbw = 500 zbw/ton kalk

➔ Prijs per eenheid zbw = 60/500 = 0,12 €/zbw

Op deze manier werd berekend dat, om alle percelen in Vlaanderen binnen de pH-streefzone te brengen, een (éénmalige) bekalkingshoeveelheid van in totaal 605 miljoen zbw nodig is, wat overeenkomt met een (eenmalige) investering van 73 miljoen € (Tabel 35). Dit komt neer op een gemiddelde van 944 zbw/ha hetzij 113 €/ha. De extreme gevallen, waar zeer hoge kalkdosissen vereist zijn, zullen gedurende verschillende jaren een inspanning vragen om ze in orde te brengen.

Belangrijke opmerking: de kalkdosissen nodig om de percelen binnen de pH-streefzone te brengen werden berekend voor een normale bouwvoordiepte van 23 cm voor akkerpercelen (en 6 cm voor weilandpercelen). Als er dieper geploegd wordt zal er ook meer kalk moeten toegediend worden om de pH van de ganse bouwvoor in de streefzone te brengen of te houden en zal de kostprijs hoger liggen.

In Figuur 38 wordt de gemiddelde vereiste herstelbekalkingsdosis per teeltgroep in Vlaanderen weergegeven.

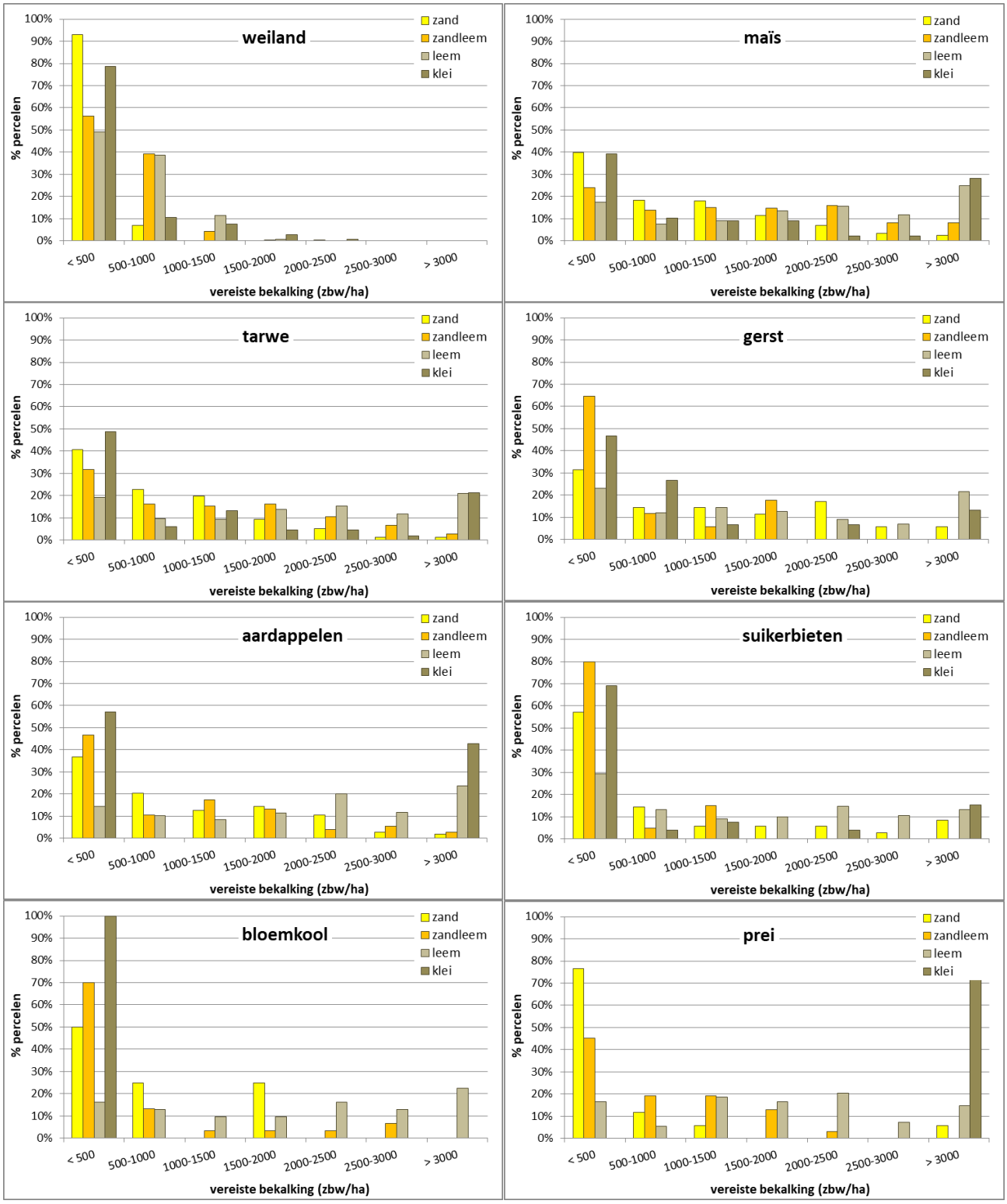


Figuur 38: Gemiddelde vereiste herstelbekalkingsdosis per teeltgroep

In Figuur 39 worden de frequentieverdelingen van de vereiste bekalkingshoeveelheden per teeltgroep voorgesteld. Hier valt op dat vooral bij de maïs- en graanpercelen een relatief groot aandeel nog een significante bekalkingsdosis vereist. De suikerbieten- en bloemkoolpercelen vereisen globaal gezien minder bekalking en/of lagere dosissen.

Tabel 37: Gemiddelde, maximale en totale vereiste bekalking om de pH in de streefzone te brengen per teeltgroep en per bodemtextuurklasse, uitgedrukt in zbw en in € (kostprijs)

	zand				zandleem				leem				klei				Vlaanderen			
	vereiste bekalking (zbw)		kostprijs (€)		vereiste bekalking (zbw)		kostprijs (€)		vereiste bekalking (zbw)		kostprijs (€)		vereiste bekalking (zbw)		kostprijs (€)		vereiste bekalking (zbw)		kostprijs (€)	
	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal	gemid.	totaal
	/ha	$.10^6$	€/ha	$.10^6$	/ha	$.10^6$	€/ha	$.10^6$	/ha	$.10^6$	€/ha	$.10^6$	/ha	$.10^6$	€/ha	$.10^6$	/ha	$.10^6$	€/ha	$.10^6$
weiland	182	26,67	22	3,20	430	31,36	52	3,76	518	7,24	62	0,87	223	4,94	27	0,59	295	75,39	35	9,05
maïs	952	110,06	114	13,21	1505	84,53	181	10,14	2000	19,44	240	2,33	1866	18,64	224	2,24	1258	241,01	151	28,92
tarwe	807	6,13	97	0,74	1066	29,43	128	3,53	1807	27,55	217	3,31	1429	22,86	172	2,74	1588	105,48	191	12,66
gerst	1660	3,93	199	0,47	398	2,47	48	0,30	1569	4,91	188	0,59	894	1,77	107	0,21	1488	20,34	179	2,44
andere granen	845	2,24	101	0,27	0				1588	0,38	191	0,05					1124	4,89	135	0,59
aardappelen	991	12,73	119	1,53	874	15,34	105	1,84	2024	8,54	243	1,02	4662	14,45	559	1,73	1721	64,93	207	7,79
suikerbieten	594	1,15	71	0,14	294	2,51	35	0,30	1505	9,75	181	1,17	1028	3,49	123	0,42	1138	23,18	137	2,78
wortelen	271	0,36	32	0,04	1109	1,17	133	0,14	1336	0,47	160	0,06					1149	3,14	138	0,38
erwten	104	0,05	13	0,01	71	0,08	8	0,01	1338	1,16	161	0,14					987	2,78	118	0,33
bloemkool	533	0,52	64	0,06	691	1,34	83	0,16	1890	0,08	227	0,01					1228	3,68	147	0,44
prei	473	0,58	57	0,07	732	1,24	88	0,15	1683	0,02	202	0,00	8065	0,15	968	0,02	1233	3,65	148	0,44
andere groenten	953	5,71	114	0,69	634	6,10	76	0,73	1388	2,26	167	0,27	8598	10,45	1032	1,25	1177	21,73	141	2,61
andere akkerteelten	864	8,03	104	0,96	1452	10,72	174	1,29	1980	3,84	238	0,46	3041	8,74	365	1,05	1615	34,71	194	4,17
totaal	577	178,15	69	21,38	874	186,30	105	22,36	1481	85,63	178	10,28	1393	85,47	167	10,26	944	604,91	113	72,59



Figuur 39: Frequentieverdeling van de vereiste herstelbekalkingen om de pH in de streefzone te brengen, per teeltgroep en per bodemtextuurklasse

6.2.4 Praktische implementatie

6.2.4.1 Tijdelijk effect van bekalking op N-mineralisatie en nitraatresidu

In de winter die volgt op het toedienen van de bekalking moeten we rekening houden met een tijdelijke toename van de N-mineralisatie (zie 4.2.1.1). Op basis van literatuurstudie en eigen proefresultaten werd, in samenspraak met de opdrachtgever afgesproken om hiervoor uit te gaan van een verhoging van de N-mineralisatie na bekalking met 30% gedurende 1 jaar, waarvan de helft (dus 15%) tijdens de winter die volgt op de bekalking. Deze extra 15% mineralisatie zal dus meegeteld moeten worden voor mogelijke uitspoeling tijdens de eerstvolgende winter na toepassing van een bekalking.

Echter, voor weilanden en akkers (granen) waar de bekalking toegediend wordt in het najaar (op de stoppel), gevolgd door de inzaai van een groenbedekker of een winterteelt, kunnen we er van uitgaan dat deze extra N-mineralisatie grotendeels opgenomen wordt door de groenbedekker of de winterteelt.

In Tabel 36 en Tabel 37 wordt de invloed van deze extra mineralisatie op de mogelijke N-uitspoeling in de winter die volgt op de bekalking berekend, respectievelijk met de nitraatresidu-gegevens van de EVANIR-dataset en van de VLM-dataset. Het uitvoeren van een éénmalige herstelbekalking in de percelen zonder gewasbedekking in de winter zou de totale N-uitspoeling gedurende de winter volgend op de bekalking verhogen met 2,8% (o.b.v. de EVANIR-dataset) of 3,2% (o.b.v. de VLM-dataset).

Tabel 38: Tijdelijk effect van bekalking op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter die volgt op de bekalking, per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. de EVANIR-dataset

	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)		Zandleem (Zandleemstreek)		Leem (Leemstreek+Weidestreek)		Klei (Polders)		Vlaanderen	
	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5.63	5.64	2.35	2.35	0.31	0.31	1.29	1.29	9.59	9.60
maïs	12.21	12.63	3.95	4.16	0.46	0.48	0.52	0.55	17.15	17.83
tarwe	0.50	0.52	1.37	1.41	0.49	0.51	0.83	0.85	3.19	3.29
gerst	0.20	0.20	0.22	0.22	0.07	0.08	0.09	0.09	0.58	0.59
andere granen	0.16	0.17	0.06	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.22	0.24
aardappelen	1.27	1.32	1.35	1.39	0.27	0.27	0.19	0.20	3.08	3.18
suikerbieten	0.12	0.13	0.37	0.38	0.20	0.22	0.18	0.18	0.87	0.91
wortelen	0.12	0.12	0.05	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.19	0.19
erwten	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.11	0.11
bloemkool	0.08	0.08	0.13	0.14	0.00	0.00	0.01	0.01	0.22	0.22
prei	0.10	0.10	0.11	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22
andere groenten	0.68	0.70	0.67	0.68	0.08	0.08	0.10	0.10	1.52	1.56
andere akkerteelten	0.74	0.78	0.48	0.50	0.09	0.09	0.12	0.12	1.42	1.50
totaal	21.85	22.42	11.14	11.51	2.03	2.09	3.33	3.40	38.35	39.43
/ procesfactor 2,1	10.41	10.68	5.31	5.48	0.96	1.00	1.59	1.62	18.26	18.77

Tabel 39: Tijdelijk effect van bekalking op de N-hoeveelheid die migreert tot onderaan de wortelzone (-90 cm) tijdens de winter die volgt op de bekalking, per teeltgroep en bodemtextuurklasse, o.b.v. de VLM-dataset

	Zand (Kempen+Vl.Zandstreek)		Zandleem (Zandleemstreek)		Leem (Leemstreek+Weidestreek)		Klei (Polders)		Vlaanderen	
	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking	huidige situatie	na bekalking
	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N	10^6 kg N
weiland	5.07	5.07	2.17	2.17	0.25	0.25	1.20	1.20	8.69	8.69
maïs	9.67	10.10	3.47	3.68	0.42	0.44	0.58	0.61	14.14	14.82
tarwe	0.43	0.45	1.27	1.30	0.42	0.43	0.82	0.84	2.94	3.03
gerst	0.17	0.17	0.21	0.22	0.08	0.08	0.11	0.11	0.57	0.58
andere granen	0.28	0.29	0.06	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.35	0.36
aardappelen	1.16	1.21	1.28	1.32	0.23	0.24	0.18	0.18	2.85	2.95
suikerbieten	0.13	0.13	0.35	0.36	0.20	0.21	0.17	0.17	0.84	0.88
wortelen	0.06	0.07	0.05	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.13	0.14
erwten	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.12	0.12
bloemkool	0.08	0.08	0.12	0.13	0.00	0.00	0.01	0.01	0.21	0.21
prei	0.09	0.09	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.21
andere groenten	0.63	0.65	0.57	0.59	0.07	0.07	0.06	0.06	1.33	1.37
andere akkerteelten	0.72	0.75	0.47	0.50	0.07	0.07	0.12	0.12	1.37	1.44
totaal	18.53	19.10	10.18	10.55	1.77	1.84	3.24	3.31	33.72	34.80
/ procesfactor 2,1	8.82	9.09	4.85	5.02	0.84	0.87	1.54	1.58	16.06	16.57

6.2.4.2 Algemene richtlijnen bij bekalking

Op basis van de bouwvooranalyse wordt een bemestings- en bekalkingsadvies opgesteld voor de eerstvolgende 3 teelten. Dat advies houdt rekening met diverse factoren zoals de perceelseigenschappen, de gewaseigenschappen en de gewasbehoeften. Bij het opstellen van het advies wordt ook nagegaan op welk moment de vereiste bekalking het best in de rotatie past. Zo wordt bijvoorbeeld vermeden dat er een grote hoeveelheid kalk wordt toegediend kort voor de teelt van aardappelen omdat dat tot een toename van schurft kan leiden en mag je meer bekalken voor bieten dan voor tarwe. Het bekalkingsadvies wordt uitgedrukt in zuurbindende waarde (zbw) per ha. De zuurbindende waarde verschilt per kalksoort en wordt altijd vermeld op het aangekocht product.

Wanneer het bekalkingsadvies aangeeft dat een herstelbekalking vereist is, wijst dit reeds op opbrengstverlies in de vorige teelten. Het is dan zowel economisch als ecologisch verantwoord om te bekalken, omdat dit er voor zal zorgen dat de N-opname door het gewas geoptimaliseerd wordt.

Het is daarbij belangrijk om zo snel mogelijk te bekalken, d.w.z. zo mogelijk onmiddellijk na de vorige teelt (bv. op de graanstoppel), en de kalk goed in te werken om een maximaal effect te hebben voor de volgende teelt. De werkingstermijn van de toegediende kalk varieert tussen enkele maanden en enkele jaren afhankelijk van het soort kalk en de toedieningswijze. Voor een snelle werking gebruik je het best een fijne kalksoort. Ook het inwerken van de kalk zorgt voor een sneller resultaat door een maximaal contact tussen de kalkdeeltjes en de bodemdeeltjes.

Op akkerbouwpercelen biedt het bekalken op de graanstoppel heel wat voordelen. Doordat alle bewerkingen op de droge grond kunnen uitgevoerd worden, wordt bodemverdichting en structuurbederf vermeden. Bovendien heeft de bekalking op de stoppel het voordeel dat de bekalkte bodem de hele winter tijd heeft om te ontzuren. Door het ontstoppelen en later het ploegen wordt de kalk ook zeer gelijkmatig over de bouwvoor vermengd. Bekalkingsproefvelden, op weliswaar sterk zure gronden, hebben vroeger spectaculaire opbrengstverhogingen aan het licht gebracht. Bekalking voor de winter leverde gemiddeld 30% meeropbrengst op bij graangewassen ten opzichte van slechts 12% bij bekalking na de winter. Voor bieten was het verschil nog groter; 48 % meeropbrengst bij bekalking voor de winter t.o.v. 9% bekalking in het voorjaar.

Bekalken heeft wel een tijdelijk effect op de mineralisatie. Bekalking stimuleert het bodemleven en bijgevolg ook de stikstofmineralisatie. Een deel van deze extra stikstof komt vrij tijdens het najaar en de winter. Om deze reden is het ten zeerste aan te bevelen om na bekalking een winterteelt of groenbedekker te zaaien om de extra vrijgekomen N vast te leggen. Door te zorgen voor een optimale pH worden de voedingselementen nadien beter benut door de volggewassen. Ook tijdens het groeiseizoen volgend op de bekalking komt nog extra stikstof vrij. Deze moet in rekening gebracht worden bij het doseren van de stikstofbemesting. Stikstofbemestingsadviezen opgesteld door het N-index-systeem van de Bodemkundige Dienst houden reeds rekening met het effect van recente bekalkingen op de stikstofmineralisatie.

Bij de keuze van de kalksoort moet ook rekening gehouden worden met de werkingstermijn (fijnere kalksoort voor snellere werking, en de eventuele correctie van het Mg- of Ca-gehalte van de bodem.

De keuze van de kalksoort moet afgestemd worden op het calcium- en magnesiumgehalte van de bodem. Op percelen met een eerder hoger Mg-gehalte maar met een Ca-gehalte lager dan de streefzone heeft een kalk met een laag magnesiumgehalte de voorkeur zodat de bodem extra wordt verrijkt met calcium en niet met

magnesium. Door een kalksoort te kiezen waarvan de Ca/Mg-verhouding aansluit bij de noden van de bodem, kan het Ca- of Mg-gehalte op een economisch voordelige manier op peil gebracht worden.

Tenslotte mag kalk nooit gemengd worden met meststoffen die fosfaten of sulfaten bevatten. Je mag dus geen kalk toedienen op een perceel waar recent drijfmest werd uitgereden of sulfaathoudende meststoffen (patentkali, kaliumsulfaat, magnesiumsulfaat, kieseriet,…) werden toegediend. Fosfaat en sulfaat zullen zich namelijk binden aan de kalkdeeltjes waardoor ze niet kunnen worden opgenomen door het gewas. Ook ammoniumhoudende meststoffen worden het best niet gemengd met kalk omdat dan een deel van de stikstof verloren gaat via vervluchtiging. Tussen het bekalken en bemesten wordt best een periode van 4 weken gerespecteerd.

6.2.5 Output en leverbaarheden

L14: Resultaten van de kosten-batenanalyse van een optimale pH voor de landbouwers: zie 6.2.

7 ONDERDEEL 4: CONCLUSIES

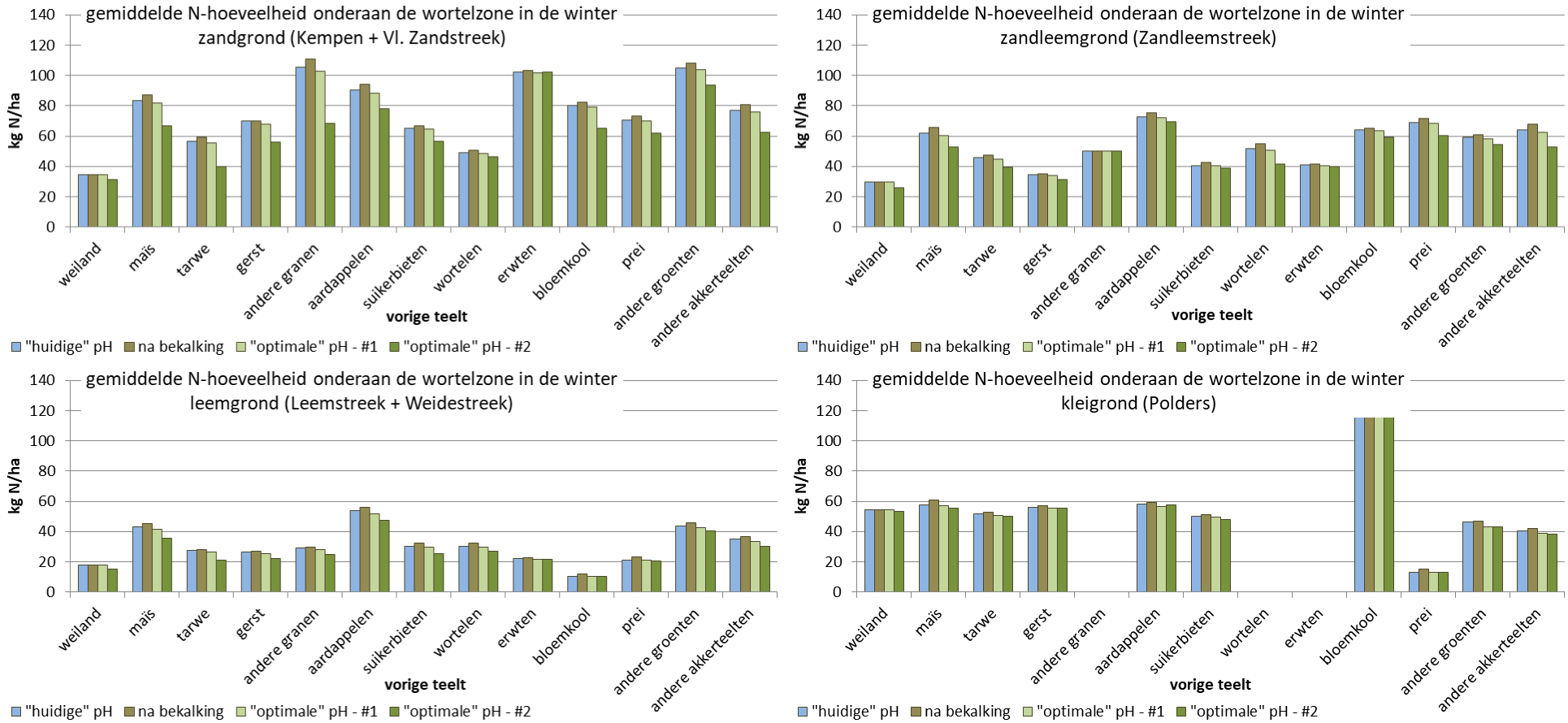
De helft van de akkerpercelen in Vlaanderen vertoont op dit moment nog een sub-optimale pH. Het uitvoeren van een herstelbekalking in deze percelen biedt interessante mogelijkheden, zowel naar financiële opbrengst voor de teler, als naar vermindering van nitraatresidu en -uitspoeling.

Direct na de bekalking zal de N-mineralisatie tijdelijk stijgen, zowel in het najaar en in de winter als in het groeiseizoen volgend op de bekalking. Het eerste deel kan (afhankelijk van de teeltrotatie) opgevangen worden door een winterteelt (wintergraan) of een groenbedekker te zaaien, zodat dit weinig of geen invloed heeft op de N-uitspoeling. Het tweede deel wordt in rekening gebracht bij het opstellen van een N-bemestingsadvies.

In de volgende jaren kan, **in normale, gemiddelde omstandigheden,** een interessante winst geboekt worden en kan de kost van de herstelbekalking gemiddeld in 1 jaar terugverdiend worden. De jaaromstandigheden zijn hierbij een belangrijk voorbehoud! Er spelen immers nog tal van andere belangrijke factoren mee, zoals weersomstandigheden en vochtvoorziening, bemesting, … en die kunnen er voor zorgen dat deze winst niet of pas op langere termijn geboekt wordt.

Een herstelbekalking is dus gemiddeld goed haalbaar voor de landbouwer en zal in de meeste gevallen een gunstig effect hebben op de N-uitspoeling (1,5% tot max. 15% minder uitspoeling, het laatste cijfer is gebaseerd op de veronderstelling dat het N-opname-tekort bij sub-optimale pH integraal in het nitraatresidu terechtkomt en dat dit opname-tekort bij optimale pH volledig wegvalt).

Ter illustratie worden in Figuur 40 per landbouwstreek en per teeltgroep de gemiddelde N-hoeveelheden onderaan de wortelzone weergegeven in de "huidige" pH-situatie, in de winter volgend op de vereiste herstelbekalking en in een "optimale" pH-situatie (volgens de 2 benaderingen). De lichte stijging van de N-hoeveelheden in de winter volgend op de bekalking kan gereduceerd worden door systematisch (als de teeltrotatie dit toelaat) een groenbedekker of winterteelt te zaaien na bekalking.



Figuur 40: Gemiddelde N-hoeveelheid onderaan de wortelzone in de winter, per landbouwstreek en per teeltgroep (berekeningen o.b.v. nitraatresidu-gegevens van de VLM-dataset)

7.1.1 Output - leverbaarheden

L15: deelrapporten en eindrapport

L16: samenvatting: zie 1.

L17: 2 powerpointpresentaties

8 REFERENTIES

Aciego Pietri J.C., Brookes P.C. (2007) Nitrogen mineralization along a pH gradient of a silty loam UK soil. Soil Biology & Biochemistry 40: 797-802.

BDB (1950) Het bekalkingsvraagstuk van onze Belgische gronden. Bodemkundige Dienst van België, 18 pp.

BDB (z.d.) Verklarende nota bij de grondontleding (https://www.bdb.be/begeleidendenota/GLB.pdf)

BDB, UGBB (2008) Analyse van nitraatstikstofresidumetingen in de tuinbouw. Eindrapport. Studie in opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij, VLM/MESTBANK/TWOL2006/MB2006/4. 177 pp.

Bertrand I., Delfosse O., Mary B. (2007) Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Appartent and actual effects. Soil Biology & Biochemistry 39: 276-288.

Boksma K. (1967) De invloed van het gehalte aan afslibbare delen en andere factoren op de optimale pH van kleigrond. Centrum voor landbouwpublikaties en landbouwdocumentatie Wageningen. 47 pp.

Boon R. (1979) Resultaten van stikstofopzoekingen. Agricultura, 27 (3), pp. 331-382.

Braekman P., Debussche B., Rombouts G. (2014) Praktijkgids Bemesting - meststoffen en groenbedekkers. Ed. Departement Landbouw en Visserij, Duurzame Landbouwontwikkeling, 78 pp.

Bries J., Moermans S. (2015) Invloed van pH op de mineralisatie van N. Presentatie tijdens de studiedag PCS Thema BODEM en BEMESTING, 17 september 2015, wetteren en Oosterzele.

Code van Goede Praktijk Bodembescherming (2015) (https://esites.vito.be/sites/reflabos/2015/Online%20documenten/CVGP_versie_februari_2015.pdf)

Commissie Bemesting Akkerbouw/Vollegrondsgroententeelt (CBAV), Handboek Bodem en Bemesting (z.d.) (www.handboekbodemenbemesting.nl)

Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, versie 2019 (https://edepot.wur.nl/413891)

Curtin D., Campbell C.A., Jalil A. (1998) Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils. Soil Biology and Biochemistry, 30 (1): 57-64.

D'Haene K., Salomez J., Verhaeghe M., Van de Sande T., De Nies J., De Neve S., Hofman G. (2018) Can optimum yield and quality of vegetables be reconciled with low residual soil mineral nitrogen at harvest? Scientia Horticulturae 233: 78-89.

Deckers S., Bries J. (2013) Basisprincipes van bekalken op de stoppel. Landbouwleven, 9/8/2013, p. 8.

DEFRA (2010) Fertiliser Manual (RB209), DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs), London. http://adlib.everysite.co.uk/adlib/defra/content.aspx?id=2RRVTHNXTS.88UEXK17ISSM6; https://ahdb.org.uk/knowledge-library/rb209-section-1-principles-of-nutrient-management-and-fertiliser-use

Dillen J., Deckers S. (2016) De bouwvooranalyse als start voor een optimale bemesting en bekalking. MAPman bouwvooranalyse, https://cvbb.be/de-bouwvooranalyse-als-start-voor-een-optimale-bemesting-en-bekalking/

European Commission (2007) Evaluation of the application of cross compliance as foreseen under regulation 1782/2003 - part I: descriptive report - final, july 2007

(https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/evaluation/market-and-income-reports/2007/cross-compliance/part1.pdf)

Franc de Ferrière (1933) Les zones de pH des sols. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 69: 74-78.

Genot V., Renneson M., Colinet G., Goffaux M.-J., Cugnon T., Toussaint B., Buffet D., Oger R. (2012) Base de données sols de Requasud (3ème synthese). http://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_sols_2012.pdf

Goulding K.W.T. (2016) Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. Soil Use and Management, 32: 390-399.

Grosso F., Baath E., De Nicola F. (2016) Bacterial and fungal growth on different plant litter in Mediterranean soils: Effects of C/N ratio and soil pH. Applied Soil Ecology 108: 1-7.

Grover S.P., Butterly C.R., Wang X., Tang C. (2017) The short-term effects of liming on organic carbon mineralisation in two acidic soils as affected by different rates and application depths of lime. Biol. Fertil. Soils, 53: 431:443.

Herelixka E., Vogels N., Vanongeval L., Geypens M., Oorts K., Rombauts S., Sammels L., Verstraeten W.W., ElSadek A., Feyen J., Coppens F., Merckx R., D'Haene K., Moreels E., De Neve S., Salomez J., Boeckx P., Hofman G., Van Cleemput O., Librecht I., Wellens J., Van Orshoven J. (2002) Bepaling van de hoeveelheid minerale stikstof in de bodem als beleidsinstrument. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij.

Heyburn J., McKenzie P., Crawley M.J., Fornara D.A. (2017) Long-term belowground effects of grassland management: the key role of liming. Ecological Applications, 27(7): 2001-2012.

Holland J.E., Bennett A.E., Newton A.C., White P.J., McKenzie B.M., George T.S., Pakeman R.J., Bailey J.S., Fornara D.A., Hayes R.C. (2018) Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. Science of the Total Environment, 610-611: 316-332.

Holland J.E., White P.J., Glendining M.J., Goulding K.W.T., McGrath S.P. (2019) Yield responses of arable crops to liming – An evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment. European Journal of Agronomy, April 2019, Vol.105: 176-188.

Kemmit S.J., Wright D., Jones D.L. (2005) Soil acidification used as a management strategy to reduce nitrate losses from agricultural land. Soil Biology & Biochemistry 37: 867-875.

Kerschberger M., Deller B., Hege U., Heyn J., Kape H.-E., Krause O., Pollehn J., Rex M.J., Severin K. (2000) Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Ed. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/0-9-kalk.pdf.

LandbrugsInfo SEGES (z.d.) Kalkningsvejledning https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/goedskning/kalkning/sider/startside.aspx

Liu D.L., Helyar K.R., Conyers M.K., Fisher R., Poile G.J. (2004) Response of wheat, triticale and barley to lime application in semi-arid soils. Field Crops Research 90: 287–301.

Loman H. (1977) Kalkverliezen op lössbouwland en de invloed van de kalktoestand op de opbrengsten van gewassen. Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp. 14-77, 22 pp.

Loman H., Bakker Y. (1973) De betekenis van de kalktoestand van zandgronden voor de opbrengst van gewassen. Bedrijfsontwikkeling jaargang 4 (1973) 10 (oktober), pp. 919-920.

Lyngstad I. (1992) Effect of liming on mineralization of soil nitrogen as measured by plant uptake and nitrogen released during incubation. Plant and Soil 144: 247-253.

Nutrinorm1 (z.d.) De eigenschappen van kalkmeststoffen. https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/Paginas/Kalkmeststoffen-De-eigenschappen-van-kalkmeststoffen.aspx#.XNlNyo4zbcs

Nutrinorm2 (z.d.) De verzurende werking van meststoffen. https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/Paginas/Kunstmest-Verzurende-werking-van-meststoffen.aspx#.XNlZX44zbcs

Nyborg M., Hoyt P.B. (1978) Effects of soil acidity and liming on mineralization of soil nitrogen. Can. J. Soil Sci. 58: 331-338.

Odeurs W., Vandervelpen D., Elsen A., De Vliegher A., Ruysschaert G., D'Hose T., Bries J., Vandendriessche H. (2018) Derogation monitoring network of farms under Directive 2008/64/EG (MAP 5) Fourth intermediate report: Period January 2016-April 2019. Study carried out under the authority of the Flemish Land Agency by the Soil Service of Belgium and Institute for Agricultural and Fisheries Research. 349 pp.

Ridley A.M., White R.E., Helyar K.R., Morrison G.R., Heng L.K., Fisher R. (2001) Nitrate leaching loss under annual and perennial pastures with and without lime on a duplex (texture contrast) soil in humid southeastern Australia. European Journal of Soil Science, 52:237-252.

Rousk J., Brookes P.C., Baath E. (2009) Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. Appl. Environ. Microbiol. 75(6): 1589-1596.

Senwo Z.N., Tabatabai M.A. (2005) Effect of management systems on nitrogen mineralization and nitrification in soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36: 1313-1326, https://doi.org/10.1081/CSS-200056942

Simek M., Cooper J.E., Picek T., Santruckova H. (2000) Denitrification in arable soils in relation to their physico-chemical properties and fertilization practice. Soil Biology & Biochemistry, 32:101-110.

Stenuit D., Piot R. (1954) L'influence de la réaction du sol sur le rendement des cultures agricoles. Actes et Comptes rendus du Ve Congrès International de la Science du Sol, Léopoldville, 16-21 août 1954, III: 229-234.

Stenuit D. (1958) De zuurgraad en de kalktoestand van de Belgische landbouwgronden. Landbouwtijdschrift, 11e jaargang nr 4: 36.

Tits M., Coussement T., Nuyttens D., Amery F., Foqué D., Elsen F. (2018). Bemestingsvrije stroken langs waterlopen. Bodemkundige Dienst van België vzw en Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek i.o.v. de Vlaamse Landmaatschappij. Eindrapport, 23/11/2018.

Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Boon, W., Bries, J., Vandendriessche, H., (2016). Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2012-2015). Bodemkundige Dienst van België.

Tumusiime E., Wade Brorsen B., Mosali J., Biermacher J.T. (2010) Effect of nitrogen fertilization and liming on Rye-ryegrass yield and soil pH - Dynamics. Selected Paper prepared for presentation at the Agricultural & Applied Economics Association 2010 AAEA, CAES, & WAEA Joint Annual Meeting, Denver, Colorado, July 25-27, 2010.

Van Opstal M., Tits M., Beckers V., Elsen A., Van Overtveld K., Batelaan O., Van Orshoven J., Bries, J., Vandendriessche, H., Diels, J. (2014). Vernieuwde kwantificering van de verliezen van N en P vanuit de landbouw naar het oppervlaktewater. Eindrapport, mei 2014. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij door het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen (KU Leuven) en de Bodemkundige Dienst van België. 318 pp.

Van Opstal M., Coussement, T., Tits M., Baken, S., Elsen A., Vandendriessche H., Diels J. (2016). Verbeterde kalibratie en validatie van ArcNEMO. KU Leuven Departement Aard- en Omgevingswetenschappen & Bodemkundige Dienst van België vzw i.o.v. de Vlaamse Landmaatschappij en de Vlaamse Milieumaatschappij. Eindrapport, 02/03/2016. 173 pp.

Van Overtveld, K., Tits, M., Van De Vreken, P., Vandervelpen, D., Peeters, L., Batelaan, O., Van Orshoven, J., Vanderborght, J., Elsen, A., Bries, J., Vandendriessche, H., Kuhr, P., Wendland, F., Diels, J. (2011). Bepalen van procesfactoren voor oppervlaktewater en grondwater ter evaluatie van de nitraatstikstofresidu-norm. Eindrapport fase 1: statistische analyse van de beschikbare nitraatresidumetingen van de VLM. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij door het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen (K.U.Leuven), de Bodemkundige Dienst van België en het Agrosphere Institute, Forschungszentrum Jülich. 216 pp.

Van Overtveld, K., Tits, M., Van De Vreken, P., Vandervelpen, D., Peeters, L., Batelaan, O., Van Orshoven, J., Vanderborght, J., Elsen, A., Bries, J., Vandendriessche, H., Kuhr, P., Wendland, F., Diels, J. (2011). Bepalen van procesfactoren voor oppervlaktewater en grondwater ter evaluatie van de nitraatstikstofresidu-norm. Eindrapport fase 2 en fase 3. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij door het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen (K.U.Leuven), de Bodemkundige Dienst van België en het Agrosphere Institute, Forschungszentrum Jülich. 216 pp.

Vandendriessche H., Tits M., Boon W., Vogels N., Bries J., Elsen A. (2016) Bodemkundige Dienst van België - Zeven decennia bodemvruchtbaarheid in België (1945-2015). Bodemkundige Dienst van België , 156 pp.

VLM (2011) Ontwerp actieprogramma nitraatrichtlijn 2011-2014 van Vlaanderen 16 februari 2011.

VLM (2017) Nitraatresidurapport 2017 – Resultaten van de nitraatresidumetingen in Vlaanderen tot en met de staalnamecampagne van 2016. Vlaamse Landmaatschappij, 109 pp.

Wheeler D.M., Edmeades D.C., Morton J.D. (1997) Effect of lime on yield, N fixation and plant N uptake from the soil by pasture on 3 contrasting trials in New Zealand. New Zealand Journal of Agricultural Research, 40(3): 397-408.

9 BIJLAGE: OPTIMALE PH EN STREEFZONES IN VERSCHILLENDE LANDEN EN REGIO'S, VOLGENS VERSCHILLENDE BRONNEN

9.1 VLAANDEREN

9.1.1 Bodemkundige Dienst van België (akkers en weilanden)

Tabel 40: Beoordelingsklassen en streefzone voor de pH(KCl) in functie van de textuurklasse en het landgebruik (akkers of weilanden), bij een koolstofgehalte binnen de streefzone (Tits et al., 2016)

akkers

Beoordeling	pH(KCl) zand	pH(KCl) zandleem	pH(KCl) leem	pH(KCl) polders
sterk zuur	< 4,0	< 4,5	< 5,0	< 5,5
Laag	4,0 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 6,4
tamelijk laag	4,6 - 5,1	5,6 - 6,1	6,1 - 6,6	6,5 - 7,1
streefzone	5,2 - 5,6	6,2 - 6,6	6,7 - 7,3	7,2 - 7,7
tamelijk hoog	5,7 - 6,2	6,7 - 6,9	7,4 - 7,7	7,8 - 7,9
Hoog	6,3 - 6,8	7,0 - 7,4	7,8 - 8,0	8,0 - 8,1
zeer hoog	> 6,8	> 7,4	> 8,0	> 8,1

weilanden

Beoordeling	pH(KCl) zand	pH(KCl) zandleem - leem	pH(KCl) polders
sterk zuur	< 4,4	< 4,6	< 4,9
Laag	4,4 - 4,7	4,6 - 5,1	4,9 - 5,3
tamelijk laag	4,8 - 5,0	5,2 - 5,6	5,4 - 5,6
streefzone	5,1 - 5,6	5,7 - 6,2	5,7 - 6,4
tamelijk hoog	5,7 - 5,9	6,3 - 6,5	6,5 - 6,8
Hoog	6,0 - 6,4	6,6 - 7,0	6,9 - 7,2
zeer hoog	> 6,4	> 7,0	> 7,2

9.1.2 Praktijkgids bemesting meststoffen en groenbedekkers (akkers en weilanden)

Tabel 41: Optimale pH-streefzone in functie van bodemgebruik (bron: Braekman et al., 2014)

Bodemtextuur	Optimale zone zuurtegraad (pH-KCl)	
	akkerbouw & groeneteelt	weide
zand	5,0 - 5,5	4,7 - 5,1
zandleem	5,5 - 6,0	5,2 - 5,6
leem	6,0 - 6,5	5,4 - 6,1
klei	7,0 - 7,5	5,5 - 6,4

9.2 WALLONIË

9.2.1 Requasud (akkers en weilanden)

Genot et al., 2012

http://www.requasud.be/wp-content/uploads/2017/07/brochure_sols_2012.pdf

akkers

Le statut acido-basique peut être exprimé par un certain nombre de paramètres dont le pH, l'acidité d'échange ou la teneur en aluminium échangeable. En pratique, c'est le pH du sol qui est le plus couramment retenu. Celui-ci est une expression synthétique des conditions physico-chimiques qui président en partie à la structuration du sol (porosité pour l'eau et l'air), à l'activité microbienne (humification et minéralisation de la matière organique) et à la disponibilité des éléments majeurs ou des éléments en trace. Les grandes cultures présentent souvent un optimum de croissance dans la gamme de pH comprise entre 6,0 et 7,0. Le pH mesure l'activité des protons dans une suspension de terre avec une solution qui peut être de l'eau ou un sel neutre (KCl, $CaCl_2$, $BaCl_2$...). Au sein du réseau **REQUASUD**, le pH est communément mesuré dans une solution de KCl 1 N.

weiland

Les terres sous prairies se caractérisent quant à elles par un taux de matière organique important avec, pour conséquence, un pouvoir tampon plus élevé et une réaction plus lente au processus de chaulage. En outre, la couverture du sol est permanente et se caractérise par une activité racinaire durant l'essentiel de l'année. Des acides organiques sont donc libérés durant de longues périodes entraînant une plus grande acidité du milieu. Enfin, les plantes prairiales sont majoritairement des graminées pour lesquelles le pH du sol peut être plus faible qu'en grandes cultures. Le pH_{KCl} optimum pour les terres sous prairies permanentes est de 5,5 à 6,0.

9.3 NEDERLAND

9.3.1 Handboek Bodem en Bemesting (akkers)

Bron: Commissie Bemesting Akkerbouw/Vollegrondsgroententeelt (CBAV)

https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting.htm

Tabel 5.1. Waardering van de pH-$CaCl_2$ en advies-pH's op dekzand-, dal- en veengronden zonder fabrieksaardappelen in het bouwplan (1992).

Bouwplan	% Aard-appelen	% Bieten	Waardering	Organische stofgehalte (%)			
				< 5,0	5,0 - 8,0	8,0 - 15,0	> 15,0
A	50	0	Te laag	< 4,5	< 4,3	< 4,2	< 4,1
			Vrij laag	4,5 - 5,2	4,3 - 5	4,2 - 4,8	4,1 - 4,7
			Goed	5,3 - 5,6	5,1 - 5,4	4,9 - 5,3	4,8 - 5,2
			Hoog	> 5,6	> 5,4	> 5,3	> 5,2
			Bekalken tot	5,3	5,1	4,9	4,8
B[1]	20/40	0	Te laag	< 4,6	< 4,5	< 4,4	< 4,3
			Vrij laag	4,7 - 5,4	4,5 - 5,2	4,4 - 5,1	4,3 - 4,9
			Goed	5,4 - 5,8	5,3 - 5,6	5,2 - 5,5	5 - 5,4
			Hoog	> 5,8	> 5,6	> 5,5	> 5,4
			Bekalken tot	5,4	5,3	5,2	5
C	33/50	16/25	Te laag	< 4,9	< 4,8	< 4,6	< 4,5
			Vrij laag	4,9 - 5,6	4,8 - 5,4	4,6 - 5,4	4,5 - 5,2
			Goed	5,7 - 6	5,5 - 5,9	5,4 - 5,8	5,3 - 5,6
			Hoog	> 6	> 5,9	> 5,8	> 5,6
			Bekalken tot	5,7	5,5	5,4	5,3
D	0/33	20/33	Te laag	< 4,9	< 4,9	< 4,9	< 4,8
			Vrij laag	4,9 - 5,7	4,9 - 5,7	4,9 - 5,6	4,8 - 5,4
			Goed	5,8 - 6	5,8 - 6	5,7 - 6	5,5 - 5,9
			Hoog	> 6	> 6	> 6	> 5,9
			Bekalken tot	5,8[2]	5,8	5,7	5,5

[1] *Inclusief 100% granen en continue maïs.*

[2] *De optimale pH-$CaCl_2$ voor bouwplan D bij < 5% organische stof is berekend op 6,0. Omdat de kans op het optreden van mangaangebrek toeneemt bij een pH-$CaCl_2$ > 5,5 en bij een pH-$CaCl_2$ ≥ 6,1 vrijwel altijd optreedt, is het pH-advies afgetopt op pH-$CaCl_2$ 5,8.*

Tabel 5.2. Waardering van de pH-$CaCl_2$ en advies-pH's op dekzand-, dal- en veengronden met fabrieksaardappelen in het bouwplan (AM-besmetting[1] : 500/2000, HLB-methode) (1998).

Bouwplan	% Aard-appelen	% Bieten	Waardering	Organische stofgehalte (%)			
				< 5,0	5,0 - 8,0	8,0 - 15,0	> 15,0
A	50	0	Te laag	< 4,5	< 4,3	< 4,3	< 4,2
			Vrij laag	4,6 - 5,3	4,4 - 5,1	4,4 - 5	4,3 - 4,9
			Goed	5,4 - 5,7	5,2 - 5,5	5,1 - 5,4	5 - 5,4
			Hoog	> 5,8	> 5,6	> 5,5	> 5,4
			Bekalken tot	5,4	5,2	5,1	5
B	25	0	Te laag	< 4,8	< 4,6	< 4,5	< 4,3
			Vrij laag	4,9 - 5,5	4,7 - 5,4	4,6 - 5,3	4,4 - 5,1
			Goed	5,6 - 6,1	5,4 - 5,8	5,4 - 5,7	5,2 - 5,5
			Hoog	> 6,2	> 5,9	> 5,8	> 5,6
			Bekalken tot	5,6	5,4	5,4	5,2
C	50	25	Te laag	< 4,7	< 4,5	< 4,4	< 4,3
			Vrij laag	4,8 - 5,4	4,6 - 5,3	4,5 - 5,2	4,4 - 5,1
			Goed	5,5 - 6	5,4 - 5,7	5,3 - 5,6	5,2 - 5,5
			Hoog	> 6,1	> 5,8	> 5,7	> 5,6
			Bekalken tot	5,5	5,4	5,3	5,2
D	33	16	Te laag	< 4,8	< 4,7	< 4,6	< 4,4
			Vrij laag	4,9 - 5,5	4,8 - 5,4	4,7 - 5,4	4,5 - 5,2
			Goed	5,6 - 6,1	5,5 - 6	5,4 - 5,8	5,3 - 5,6
			Hoog	> 6,2	> 6,1	> 5,9	> 5,7
			Bekalken tot	5,7	5,5	5,4	5,3
E	25	25	Te laag	< 4,9	< 4,8	< 4,7	< 4,5
			Vrij laag	5 - 5,6	4,9 - 5,5	4,8 - 5,4	4,6 - 5,3
			Goed	5,7 - 6,2	5,6 - 6,1	5,5 - 6	5,4 - 5,7
			Hoog	> 6,3	> 6,2	> 6,1	> 5,8
			Bekalken tot	5,7	5,6	5,5	5,4
F	20	20	Te laag	< 5	< 4,9	< 4,8	< 4,6
			Vrij laag	5,1 - 5,7	5 - 5,6	4,9 - 5,5	4,7 - 5,4
			Goed	5,8 - 6,3	5,7 - 6,2	5,6 - 6,1	5,4 - 5,8
			Hoog	> 6,4	> 6,3	> 6,2	> 5,9
			Bekalken tot	5,8	5,7	5,6	5,4
G	16	33	Te laag	< 5	< 5	< 4,9	< 4,8
			Vrij laag	5,1 - 5,7	5,1 - 5,7	5 - 5,6	4,9 - 5,5
			Goed	5,8 - 6,3	5,8 - 6,3	5,7 - 6,2	5,6 - 6,1
			Hoog	> 6,4	> 6,4	> 6,3	> 6,2
			Bekalken tot	5,8	5,8	5,7	5,6

[1] *Bij een besmetting lager dan 500 is de geadviseerde pH 0,1 eenheid hoger.*
Bij een besmetting hoger dan 2000 is de geadviseerde pH 0,1 eenheid lager.

[2] *De optimale pH voor een bouwplan met 20% aardappelen en 20% bieten is bij een organische stofgehalte < 5% berekend op 5,9 en voor een bouwplan met 16% aardappelen en 33% bieten op resp. 6,1 en 6,0 bij een organische stofgehalte van resp. < 5% en 5-8%. Omdat de kans op mangaangebrek toeneemt bij een pH-$CaCl_2$ >5,5 en bij een pH-$CaCl_2$ van 6,1 en hoger vrijwel altijd optreedt, is de geadviseerde pH op 5,8 gesteld.*

Tabel 5.3. Waardering van de pH-$CaCl_2$ en advies-pH's op zeeklei en zeezand[1] (1967).

Waardering	Organische stofgehalte (%)											
	1,0-1,9	2,0-2,9	3,0-4,9	5,0-7,4	7,5-9,9	10,0-12,4	12,5-14,9	15,0-19,9	20,0-24,9	25,0-29,9	30,0-34,9	> 34,9
< 8% lutum												
Zeer laag	< 5,7	< 5,3	< 5,1	< 4,8	< 4,6	< 4,4	< 4,2	< 4,1	< 3,9	< 3,8	< 3,7	< 3,6
Laag	5,7 - 6,3	5,3 - 5,8	5,1 - 5,5	4,8 - 5,3	4,6 - 5,1	4,4 - 4,9	4,2 - 4,7	4,1 - 4,5	3,9 - 4,3	3,8 - 4,1	3,7 - 4	3,6 - 3,9
Vrij laag	6,4 - 6,7	5,9 - 6,2	5,6 - 5,9	5,4 - 5,6	5,2 - 5,4	5 - 5,3	4,8 - 5,1	4,6 - 4,9	4,4 - 4,7	4,2 - 4,5	4,1 - 4,3	4 - 4,1
Goed	> 6,7	> 6,2	> 5,9	> 5,6	> 5,4	> 5,3	> 5,1	> 4,9	> 4,7	> 4,5	> 4,3	> 4,1
Bekalken tot	6,7	6,3	6	5,7	5,5	5,4	5,2	5	4,8	4,6	4,4	4,2
8-12% lutum												
Zeer laag	< 5,7	< 5,4	< 5,2	< 5	< 4,8	< 4,6	< 4,4	< 4,2	< 4,1	< 3,9	< 3,8	< 3,7
Laag	5,7 - 6,3	5,4 - 5,9	5,2 - 5,6	5 - 5,4	4,8 - 5,3	4,6 - 5,1	4,4 - 4,9	4,2 - 4,7	4,1 - 4,5	3,9 - 4,3	3,8 - 4,1	3,7 - 4
Vrij laag	6,4 - 6,7	6 - 6,3	5,7 - 6	5,5 - 5,8	5,4 - 5,6	5,2 - 5,4	5 - 5,3	4,8 - 5,1	4,6 - 4,9	4,4 - 4,7	4,2 - 4,5	4,1 - 4,2
Goed	> 6,7	> 6,3	> 6	> 5,8	> 5,6	> 5,4	> 5,3	> 5,1	> 4,9	> 4,7	> 4,5	> 4,2
Bekalken tot	6,7	6,4	6,1	5,9	5,7	5,5	5,4	5,2	5	4,8	4,6	4,3
12-18% lutum												
Zeer laag	< 5,7	< 5,4	< 5,3	< 5,2	< 5	< 4,8	< 4,6	< 4,4	< 4,1	< 4	< 3,9	< 3,7
Laag	5,7 - 6,3	5,4 - 6	5,3 - 5,8	5,2 - 5,6	5 - 5,4	4,8 - 5,3	4,6 - 5,1	4,4 - 4,9	4,1 - 4,6	4 - 4,4	3,9 - 4,2	3,7 - 4
Vrij laag	6,4 - 6,7	6,1 - 6,4	5,9 - 6,2	5,7 - 6	5,5 - 5,8	5,4 - 5,6	5,2 - 5,4	5 - 5,3	4,7 - 5	4,5 - 4,8	4,3 - 4,6	4,1 - 4,3
Goed	> 6,7	> 6,4	> 6,2	> 6	> 5,8	> 5,6	> 5,4	> 5,3	> 5	> 4,8	> 4,6	> 4,3
Bekalken tot	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,7	5,5	5,4	5,1	4,9	4,7	4,4

Waardering	Organische stofgehalte (%)											
	1,0-1,9	2,0-2,9	3,0-4,9	5,0-7,4	7,5-9,9	10,0-12,4	12,5-14,9	15,0-19,9	20,0-24,9	25,0-29,9	30,0-34,9	> 34,9
18-25% lutum												
Zeer laag	< 5,8	< 5,6	< 5,4	< 5,3	< 5,2	< 5	< 4,8	< 4,5	< 4,2	< 4,1	< 3,9	< 3,8
Laag	5,8 - 6,4	5,6 - 6,2	5,4 - 6	5,3 - 5,8	5,2 - 5,6	5 - 5,4	4,8 - 5,3	4,5 - 5	4,2 - 4,7	4,1 - 4,5	3,9 - 4,3	3,8 - 4,1
Vrij laag	6,5 - 6,7	6,3 - 6,6	6,1 - 6,4	5,9 - 6,2	5,7 - 6	5,5 - 5,8	5,4 - 5,6	5,1 - 5,4	4,8 - 5,1	4,6 - 4,9	4,4 - 4,7	4,1 - 4,4
Goed	> 6,7	> 6,6	> 6,4	> 6,2	> 6	> 5,8	> 5,6	> 5,4	> 5,1	> 4,9	> 4,7	> 4,4
Bekalken tot	6,8	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,7	5,4	5,2	5	4,8	4,5
25-30% lutum												
Zeer laag	< 6	< 5,9	< 5,7	< 5,5	< 5,4	< 5,2	< 5	< 4,7	< 4,4	< 4,1	< 4	< 3,8
Laag	6 - 6,6	5,9 - 6,5	5,7 - 6,3	5,5 - 6,1	5,4 - 5,9	5,2 - 5,6	5 - 5,4	4,7 - 5,2	4,4 - 4,9	4,1 - 4,6	4 - 4,4	3,8 - 4,1
Vrij laag	6,7 - 7	6,6 - 6,8	6,4 - 6,7	6,2 - 6,5	6 - 6,3	5,7 - 6	5,5 - 5,8	5,3 - 5,5	5 - 5,3	4,7 - 5	4,5 - 4,8	4,2 - 4,5
Goed	> 7	> 6,8	> 6,7	> 6,5	> 6,3	> 6	> 5,8	> 5,5	> 5,3	> 5	> 4,8	> 4,5
Bekalken tot	7,1	6,9	6,7	6,6	6,4	6,1	5,9	5,6	5,4	5,1	4,9	4,6
30-35% lutum												
Zeer laag	< 6,1	< 6	< 6	< 5,7	< 5,5	< 5,3	< 5,2	< 4,9	< 4,6	< 4,3	< 4,1	< 3,9
Laag	6,1 - 6,7	6 - 6,6	6 - 6,5	5,7 - 6,3	5,5 - 6,1	5,3 - 5,8	5,2 - 5,6	4,9 - 5,4	4,6 - 5,1	4,3 - 4,8	4,1 - 4,5	3,9 - 4,2
Vrij laag	6,7 - 7,1	6,7 - 7	6,6 - 6,9	6,4 - 6,7	6,2 - 6,5	5,9 - 6,2	5,7 - 6	5,4 - 5,7	5,2 - 5,4	4,9 - 5,2	4,6 - 4,9	4,3 - 4,6
Goed	> 7,1	> 7	> 6,9	> 6,7	> 6,5	> 6,2	> 6	> 5,7	> 5,4	> 5,2	> 4,9	> 4,6
Bekalken tot	7,2	7,1	7	6,7	6,6	6,3	6,1	5,8	5,5	5,3	5	4,7

Waardering	Organische stofgehalte (%)											
	1,0-1,9	2,0-2,9	3,0-4,9	5,0-7,4	7,5-9,9	10,0-12,4	12,5-14,9	15,0-19,9	20,0-24,9	25,0-29,9	30,0-34,9	> 34,9
≥ 35% lutum												
Zeer laag	< 6,1	< 6,1	< 6	< 5,9	< 5,7	< 5,4	< 5,2	< 5	< 4,7	< 4,4	< 4,1	< 3,9
Laag	6,1 - 6,7	6,1 - 6,7	6 - 6,6	5,9 - 6,5	5,7 - 6,3	5,4 - 6	5,2 - 5,7	5 - 5,4	4,7 - 5,2	4,4 - 4,9	4,1 - 4,6	3,9 - 4,3
Vrij laag	6,7 - 7,1	6,7 - 7,1	6,7 - 7	6,6 - 6,8	6,4 - 6,7	6,1 - 6,4	5,8 - 6,1	5,5 - 5,8	5,3 - 5,5	5 - 5,3	4,7 - 5	4,4 - 4,7
Goed	> 7,1	> 7,1	> 7	> 6,8	> 6,7	> 6,4	> 6,1	> 5,8	> 5,5	> 5,3	> 5	> 4,7
Bekalken tot	7,2	7,2	7,1	6,9	6,7	6,5	6,2	5,9	5,6	5,4	5,1	4,8

[1] *In alle gevallen dat de grond meer dan 2% $CaCO_3$ bevat, wordt geen kalkgift geadviseerd.*

9.3.2 Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (weilanden)

https://edepot.wur.nl/413891

Tabel 2-1 Waardering van de pH-KCl van grasland op zand, dalgrond, löss, zeeklei, rivierklei en overgangsgronden

Waardering	pH-KCl	Advies
Te laag	< 4,4	bekalken tot 5,0
Vrij laag	4,4-4,7	bekalken tot 5,0
Goed	4,8-5,5	niet bekalken
Vrij hoog	5,6-6,1	niet bekalken
Hoog	> 6,1	niet bekalken

Tabel 2-2 Waardering van de pH-KCl van grasland op veen (≥ 25 % org. stof)

Waardering	pH-KCl	Advies
Te laag	< 4,1	bekalken tot 4,8
Vrij laag	4,1-4,5	bekalken tot 4,8
Goed	4,6-5,2	niet bekalken
Vrij hoog	5,3-5,8	niet bekalken
Hoog	> 5,8	niet bekalken

9.4 DUITSLAND

9.4.1 Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (akkers en weilanden)

Kerschberger et al., 2000

https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/0-9-kalk.pdf

Tabelle 3: Rahmenschema für **Ackerland** zur Einstufung der pH-Werte des Bodens ($CaCl_2$-Methode) in pH-Klasse C (anzustrebender/optimaler pH-Bereich) sowie Erhaltungskalkung (dt CaO/ha). Die empfohlenen Kalkmengen beinhalten den Kalkbedarf bis zur nächsten Bodenuntersuchung (nach Ablauf einer Fruchtfolge). Die Ausbringung erfolgt zu kalkanspruchsvollen Kulturen.

Bodenartengruppe/vorwiegende Bodenart		Humusgehalt des Bodens (%)				
		≤ 4	4,1 bis 8,0	8,1 bis 15,0	15,1 bis 30	> 30
		pH-Werte der Klasse C und Erhaltungskalkung				
1/Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,4 bis 5,8 6	5,0 bis 5,4 5	4,7 bis 5,1 4	4,3 bis 4,7 3	
2/schwach lehmiger Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,8 bis 6,3 10	5,4 bis 5,9 9	5,0 bis 5,5 8	4,6 bis 5,1 4	
3/stark lehmiger Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,1 bis 6,7 14	5,6 bis 6,2 12	5,2 bis 5,8 10	4,8 bis 5,4 5	
4/sandiger/schluffiger Lehm	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,3 bis 7,0[1)] 17	5,8 bis 6,5 15	5,4 bis 6,1 13	5,0 bis 5,7 6	
5/toniger Lehm bis Ton	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,4 bis 7,2[1)] 20	5,9 bis 6,7 18	5,5 bis 6,3 16	5,1 bis 5,9 7	
6/Hochmoor und saures Niedermoor[2)]	pH-Klasse C dt CaO/ha					4,3 [3)]

1) auf karbonathaltigen Böden (freier Kalk): keine Erhaltungskalkung
2) Auf einem Großteil der Niedermoore sind die pH-Werte geogen bedingt > 6,5
3) keine Erhaltungskalkung

Tabelle 4: Rahmenschema für **Grünland** zur Einstufung der pH-Werte des Bodens ($CaCl_2$-Methode) in pH-Klasse C (anzustrebender/optimaler pH-Bereich) sowie Erhaltungskalkung (dt CaO/ha). Die empfohlenen Kalkmengen beinhalten den Kalkbedarf bis zur nächsten Bodenuntersuchung.

Bodenartengruppe/vorwiegende Bodenart		Humusgehalt des Bodens (%)		
		≤ 15	15,1 bis 30	> 30
		pH-Werte der Klasse C und Erhaltungskalkung		
1/Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	4,7 bis 5,2 4	4,3 bis 4,7 2	
2/schwach lehmiger Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,2 bis 5,7 5	4,6 bis 5,1 3	
3/stark lehmiger Sand	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,4 bis 6,0 6	4,8 bis 5,4 4	
4/sandiger/schluffiger Lehm	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,6 bis 6,3 7	5,0 bis 5,7 5	
5/toniger Lehm bis Ton	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,7 bis 6,5 8	5,1 bis 5,9 6	
6/Hochmoor und saures Niedermoor[1)]	pH-Klasse C dt CaO/ha			4,3 [2)]

1) Auf einem Großteil der Niedermoore liegen die pH-Werte geogen bedingt > 6,5.
2) keine Erhaltungskalkung

9.5 VERENIGD KONINKRIJK

9.5.1 Fertiliser Manual (RB209) (akkers en weilanden)

DEFRA, 2010

https://ahdb.org.uk/knowledge-library/rb209-section-1-principles-of-nutrient-management-and-fertiliser-use

Table 1.1 Optimum soil pH

	Optimum soil pH[a]	
	Mineral soils	Peaty soils
Continuous arable cropping	6.5[b]	5.8
Grass with an occasional barley crop	6.2	5.5
Grass with an occasional wheat or oat crop	6.0	5.3
Continuous grass or grass/clover swards	6.0	5.3

a. The optimum pH is based on soil that has been correctly sampled. In some soil samples containing fragments of free lime, analysis of the ground soil sample in the laboratory can give a misleadingly high value for pH.

b. In arable rotations, growing acid-sensitive crops such as sugar beet, maintaining soil pH between 6.5 and 7.0 is justified.

9.6 DENEMARKEN

9.6.1 LandbrugsInfo SEGES (akkers)

https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/goedskning/kalkning/sider/startside.aspx

Jordtype, JB-nr.	Sædskifte mht. følsomme afgrøder	Meget lavt	Lavt	Middel (tilstræbt niveau)	Højt	Meget højt
1-4	Tolerante	U. 5,2	5,2-5,7	5,8-6,1	6,2-6,5	O. 6,5
	Middel	U. 5,5	5,5-5,9	6,0-6,3	6,4-6,7	O. 6,7
	Følsomme	U. 5,7	5,7-5,9	6,0-6,5	6,6-6,9	O. 6,9
5-6	Tolerante	U. 5,3	5,3-6,0	6,1-6,5	6,6-6,9	O. 6,9
	Middel	U. 5,5	5,5-6,2	6,3-6,7	6,8-7,1	O. 7,1
	Følsomme	U. 5,7	5,7-6,4	6,5-6,9	7,0-7,3	O. 7,3
7-9	Tolerante	U. 5,3	5,3-6,3	6,4-6,7	6,8-7,2	O. 7,2
	Middel	U. 5,5	5,5-6,5	6,6-6,9	7,0-7,4	O. 7,4
	Følsomme	U. 5,7	5,7-6,7	6,8-7,1	7,2-7,6	O. 7,6
11	Tolerante	U. 4,3	4,3-4,7	4,8-5,2	5,3-5,7	O. 5,7
	Middel	U. 4,5	4,5-4,9	5,0-5,4	5,5-5,9	O. 5,9
	Følsomme	U. 4,7	4,7-5,1	5,2-5,6	5,7-6,1	O. 6,1

1 = grof zand (0-5% klei)
2 = fijn zand (0-5% klei)
3 = grof zand met kleimenging (5-10% klei)
4 = fijn zand met kleimenging (5-10% klei)
5 = klei met grof-zandmenging (10-15% klei)
6 = klei met fijn-zandmenging (10-15% klei)
7 = klei (15-25% klei)
8 = zware klei (25-45% klei)
9 = zeer zware klei (45-100% klei)
10 = silt (0-50% klei, 20-100% silt)

11 = humus (>10% C)
12 = speciaal bodemtype
Klei = <2µm; silt = 2-20µm; fijn zand = 20-200µm; zand = 20-2000µm; C = humus*58.7%

9.7 US - NORTH CAROLINA

https://content.ces.ncsu.edu/soil-acidity-and-liming-for-agricultural-soils

Table 1. Soil classes in North Carolina, as defined by humic-matter content and the weight-to-volume ratio, and the target pH ranges for most field crops.

Soil Class	Humic Matter (%) and Weight/Volume Ratio (g/ml) Criteria	Target pH (most crops)
Mineral (MIN)	HM ≤ 3.37 and W/V > 0.5	6.0
Mineral-Organic (M-O)	HM ≤ 3.37 and W/V ≤ 0.5 or 3.37 < HM ≤ 5.23 and W/V > 0.5	5.5
Organic (ORG)	3.37 < HM ≤ 5.23 and W/V ≤ 0.5 or HM > 5.23	5.0