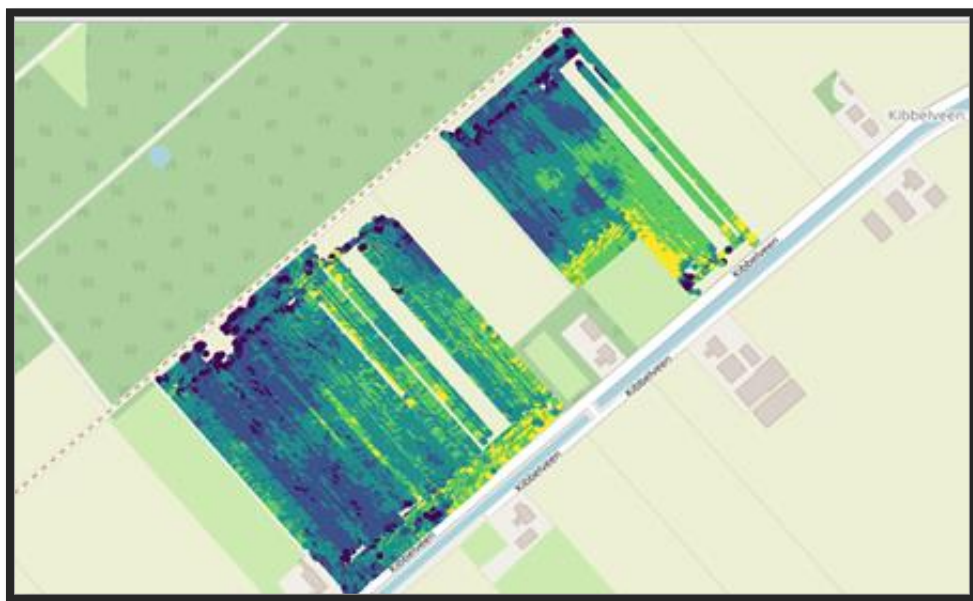


ZONDAG 6 JUNI 2021
DRONTEN



VERBAND TUSSEN NDVI, NDRE EN OPBRENGST VAN AARDAPPELEN

Aeres Hogeschool Dronten

ABSTRACT

In dit rapport is het verband tussen NDVI, NDRE en opbrengst van zetmeel aardappelen onderzocht op Drentse zandgronden

Ilona Rooker

4- Dier-Veehouderij en
Agrarisch
Ondernemerschap

Verband tussen NDVI, NDRE en opbrengst van aardappelen

Auteur: Ilona Rooker

De Stag 96

8251 DT, Dronten

3025049@aeres.nl

Onder begeleiding van docent A. ter Horst

De Drieslag 4

8252 JZ, Dronten

a.ter.horst@aeres.nl

In samenwerking met Databoerin

Zuiderdiep 222,

9571 BM 2e Exloermond

info@databoerin.nl

In opdracht van Aeres Hogeschool

De Drieslag 4

8252 JZ, Dronten

zondag 6 juni 2021, Dronten

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

Voorwoord

Voor u ligt de afstudeeronderzoek naar het verband tussen NDVI, NDRE en opbrengst van aardappelen. Het onderzoek is geschreven voor het afstudeerwerkstuk van de opleiding Dierveehouderij en agrarische ondernemerschap.

Het onderwerp is voorgekomen uit de stage bij Aeres hogeschool in samenwerking met de Databoerin. Tijdens de afstudeerstage ben ik een onderdeel van een groter project waarbij data van aardappelteelt wordt vertaald naar bruikbare informatie voor akkerbouwer, loonwerker en adviseur.

Ik wilde graag met data werken en mijn kennisgebied verbreden door in een andere agrarische tak te stappen. Dit persoonlijk doel is behaald door het uitvoeren van dit onderzoek en mijn afstudeerstage.

Hierbij wil ik mijn afstudeer coach Arjan ter Horst bedanken voor de goede begeleiding, coaching en feedback tijdens het schrijven van mijn afstudeerwerkstuk (vooronderzoek). Ook wil in Nicole Bartels bedanken, de Databoerin, voor de goede ondersteuning en uitleg over de data en dataverwerking.

Inhoud

Voorwoord
Begrippen
Samenvatting.....	1
Summary	2
1. Inleiding	3
1.1 Maatschappelijke relevantie	3
1.2 Precisielandbouw	3
1.3 Gewasreflectie en opbrengst	4
1.4 Knowledge gap	7
1.5 Hoofd- en deelvragen.....	7
1.6 Doelstelling.....	7
2. Materiaal en methode.....	8
2.1 Percelen.....	8
2.2 Materialen	8
2.3 Procedure	8
2.4 Data analyse	9
3. Resultaten.....	10
5. Conclusie en aanbevelingen	14
Bronnen	15
Bijlage I R^2 per datum per perceel van NDVI en NDRE.....	17

Begrippen

CNA	'Canopy nitrogen accumulation', stikstof ophoping in het bladerdak van een gewas
fPAR	'Fraction of the incoming absorbed photosynthetically active radiation', fractie van de inkomende geabsorbeerde fotosynthetisch actieve straling
Green-up date	Datum van wanneer het gewas boven de grond groeit
INSEY	'In-Season Estimate of Yield', seizoen 's schatting van de opbrengst
LAI	'Leaf Area Index', bladoppervlakte-index
MODIS	'Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer', apparaat aanwezig op satellieten dan data vergaard in verschillende banden en resoluties
NDRE	'Normalized difference red edge index'
NDVI	'Normalized Difference Vegetation Index'
NIR	'Near Infra-Red', nabij infrarood
R²	'R Squared' geeft aan hoeveel van de variantie in de afhankelijke variabele wordt verklaard door de onafhankelijke variabelen.
Random Forest (RF)	Een machine learning algoritme kan met een beslisboom voor verschillende doeleinden, zoals detecteren, voorspellingen en patronen opsporen
Remote sensing	Een manier voor het verkrijgen van data over een voorwerp/gewas met een instrument die niet direct contact maakt met het voorwerp/gewas
SAVI	'Soil Adjusted Vegetation Index', bodemcorrigerende vegetatie-index
Vis	'Vegetation Indices', vegetatie indexen, maat voor de bedekking en het actief groeien van vegetatie aan het oppervlak

Samenvatting

Nederland is wereldwijd een van de belangrijkste aardappelexporteurs en staat op nummer 10 op de lijst van wereldwijde aardappelproductie. Door het positieve imago en goede kwaliteit van de Nederlandse aardappel draagt Nederland stevig bij aan de mondiale voedselvoorziening. De aardappelteelt is erg belangrijk voor handel en Nederland waar een schaarste is aan landbouwgrond. Het is dus van belang om een zo hoog mogelijke opbrengst te genereren per hectare, waar precisielandbouw een rol in speelt.

Onder precisielandbouw valt het verzamelen van gewasreflectie gegevens waarmee gewasopbrengsten zijn te voorspellen, wat heeft geleid tot het uitvoeren van dit onderzoek en de hoofdvraag. In dit onderzoek is onderzocht of er betrouwbare opbrengstvoorspellingen in Nederland te verkrijgen zijn door het gebruik van NDVI en NDRE en wat het effect van het gewasgroei stadium daarop is. De hoofdvraag is uitgesplitst in drie deelvragen om de hoofdvraag te beantwoorden.

Om de hoofd- en deelvragen te beantwoorden zijn opbrengstdata, NDVI en NDRE reflecties verzameld van zes percelen in drie verschillende plaatsen in Drenthe van het jaar 2019. De opbrengstgegevens zijn in 2019 verzameld met de YieldMasterPRO welke is gekoppeld aan de rooimachine. De NDVI en NDRE data is verzameld doormiddel van wolkvrije satellietbeelden van de Sentinel-2 satelliet. De data is vervolgens gefilterd door meetfouten en outliers te verwijderen. De data leverde informatie op van zes datums verspreid door het seizoen, welke zijn ingedeeld in vier gewasgroei stadia. De NDVI en NDRE waarden zijn vervolgens per perceel per datum geanalyseerd door een lineaire regressie. De R^2 -waarden van de lineaire regressies zijn vervolgens toegepast in een ANOVA om te onderzoeken of het gewas stadium effect heeft op de opbrengstvoorspelmodellen van de gewasreflecties.

Uit onderzoek blijkt dat er een verloop van NDVI is van een stijging en daling in het groeiseizoen waarbij de hoogste R^2 -waarden zijn behaald midden in het groeiseizoen, overeenkomend met de literatuur. Daarentegen waren de R^2 -waarden laag. Daarnaast behaalde NDRE soortgelijke resultaten en blijkt dat NDRE ook van toepassing kan zijn in de aardappelteelt. Ook blijkt er veel spreiding te zijn in de R^2 -waarden zowel binnen als tussen de gewasreflecties waardoor er geen significant verschil is gevonden tussen de resultaten van NDVI en NDRE.

Aan de hand van de lage R^2 -waarden in vergelijking tot de literatuur, is het bij vervolgonderzoek te adviseren de pre-processing van de data te herzien en de methode voor het verzamelen van de data.

Summary

The Netherlands is one of the most important potato exporters worldwide and is number 10 on the list of the global potato production. Thanks to the positive image and good quality of the Dutch potato, the Netherlands makes a significant contribution to the global food supply. Potato cultivation is very important for trade in the Netherlands, where there is a scarcity of agricultural land. Therefore, it is important to generate the highest possible yield per hectare, in which precision agriculture plays a role.

Precision farming includes the collection of crop reflection data that can be used to predict crop yields, which led to the conduct of this research and the main question. This study examined whether reliable yield predictions can be obtained in the Netherlands by using NDVI and NDRE and the effect on the crop growth stage on those crop reflections. The main question is divided into three sub-questions to answer the main question.

To answer the main and sub-questions, yield data, NDVI and NDRE were collected from six fields in three different places in Drenthe in 2019. The yield data was collected in 2019 with the YieldMasterPRO which is linked to the harvester. The NDVI and NDRE data were collected using cloud-free satellite images from the Sentinel-2 satellite. Then, the data was filtered by removing measurement errors and outliers. The data provided information from six dates throughout the season, which are classified into four crop growth stages. The NDVI and NDRE values were analysed per field per date by a linear regression. Subsequently the R^2 -values of the linear regressions were applied in an ANOVA to investigate whether the crop stage effects the yield prediction models of the crop reflections.

Research shows that there is gradient in values of NDVI from in the growing season with the highest R^2 -values being achieved in the middle of the growing season, in accordance with the literature. In contrast, the R^2 values were low. In addition, NDRE achieved similar results and it appears that NDRE can also be applicable in potato cultivation. There appears to be a large spread in the R^2 values both within and between the crop reflections, causing that no significant difference was found between the results of NDVI and NDRE.

Based on the low R^2 -values compared to the literature, it is advisable to review the pre-processing of the data in future research and the method for collecting the data.

1. Inleiding

In dit onderzoek is literatuur onderzocht naar het verband tussen NDVI, NDRE en aardappelopbrengst. De inleiding start met de maatschappelijke relevantie van het onderwerp gevolgd door uitleg over precisielandbouw. Daarna wordt eerder onderzoek uiteengezet en de knowledge gap beschreven. Naar aanleiding van de knowledge gap zijn hoofd- en deelvragen opgesteld voor nader onderzoek.

1.1 Maatschappelijke relevantie

Nederland bestaat voor 54 procent uit landbouw, dit is ruim 2,2 miljoen hectare (*Minder Landbouw, Meer Natuur*, n.d.). Van deze ruim 2,2 miljoen hectare is 531,9 duizend hectare akkerbouw. Akkerbouw is teelt van gewassen in de volle grond, voornamelijk voor industriële verwerking. Onder akkerbouwgewassen vallen onder andere granen, aardappelen, peulvruchten, akkerbouwgroenten en braakland. Het totaal aantal akkerbouw bedrijven in Nederland is vanaf 1960 flink gedaald van 193 duizend naar 19 duizend in 2019 (Agrimatie, 2020; Sataloff et al., n.d.).

Ondanks de krimp van het aantal bedrijven is het areaal in aardappelteelt in Nederland bijna gelijk gebleven. In 1987 werd er op 168 duizend hectare aardappelen verbouwd en in 2019 op 167,5 duizend hectare. (Agrimatie, 2020; Sataloff et al., n.d.) Nederland staat op nummer 10 in de lijst van de wereldwijde aardappelproductie. In deze lijst staat China op nummer 1 gevolgd door India, Rusland en Oekraïne. Nederland is wereldwijd de belangrijkste exporteur met in 2016 een export ter waarde van 2,4 miljard euro en de wereldhandel in aardappelen groeit nog steeds (*Wereldaardappelproductie per Land - AtlasBig.Com*, n.d.). Op gebied van handel is Nederland de marktleider met een marktaandeel van 60 procent in de pootgoedhandel wat al jaren stabiel is ondanks de groeiende wereldwijde handel. Door het positieve imago en goede kwaliteit van de Nederlandse aardappel draagt Nederland stevig bij aan de mondiale voedselvoorziening (LNV, 2018).

1.2 Precisielandbouw

De aardappelteelt is erg belangrijk voor Nederland en de handel. Door de schaarste aan landbouwgrond in Nederland is het belangrijk om efficiënt te telen en een zo hoog mogelijke opbrengst per hectare te genereren (Wolfert et al., 2017). Met precisielandbouw vervangen machines de menselijke handelingen en kan men de opbrengsten verbeteren. Precisielandbouw is met behulp van data en algoritmen het toepassen van de juiste teeltmaatregel, op de juiste plek op het juiste moment. Bij precisielandbouw krijgen planten met behulp van technologie gerichte behandelingen. Om precisielandbouw toe te passen zijn verschillende technologieën en methoden ontwikkeld voor het verzamelen van data over de gewassen zoals GPS, sensortechnologie en robotisering (Barnes et al., 2019). Deze technieken kunnen strategische besluiten op bedrijfsniveau en handelingen op plantniveau ondersteunen. In de klassieke landbouw maakt men keuzes op veldniveau, bij precisielandbouw gebeurt dit per vierkante meter. Teelthandelingen op plantniveau vormen de basis voor verdere optimalisering van de productie en verduurzaming van de teelten. (*Precisielandbouw - WUR*, n.d.)

Precisielandbouw is een manier om de duurzaamheid van de landbouw te vergroten en geen doel op zich. In de jaren tachtig is het eerste concept van precisielandbouw ontstaan, hier introduceerden onderzoekers de termen Site Specific Crop Management en Variable Rate Application. Vanaf daar is de technologie snel doorontwikkeld en is het een bedrijfsmanagementconcept geworden. De trend van precisielandbouw zal doorzetten en zich steeds verder ontwikkelen. (Kempenaar et al., 2019)

1.3 Gewasreflectie en opbrengst

Een onderdeel van precisielandbouw is het meten van gewasreflectie. Gewasreflectie is meetbaar door multispectraal sensoren in satellieten of drones en de toepassing van vegetatie-indexen. De multispectraal sensoren maken gebruik van zonlicht en vangen het door het gewas gereflecteerde licht op, van rood, groen, blauw en nabij infrarood (NIR) licht. De vegetatie index wordt berekend om de toestand van een gewas met behulp van lichtreflectie te kunnen vergelijken met reeds vanuit literatuur bekende gewaseigenschappen (Kooistra et al., 2011). In Nederland, en daarbuiten, passen ondernemers dit bijvoorbeeld toe in de aardappelteelt. Vanwege de toenemende vraag om goed gewasmanagement, is het voorspellen van de opbrengst ruim voor de oogst erg belangrijk geworden (Farooque et al., 2020). In de afgelopen jaren hebben onderzoeken, waarbij gebruik werd gemaakt van teledetectiegegevens in combinatie met validatie op veldniveau, een hoge correlatie aangetoond tussen vegetatie-indexen en opbrengst (Al-Gaadi et al., 2016; Farooque et al., 2020). Gewasreflecties komen in combinatie met satellietbeelden en vegetatie-indexen in verschillende onderzoeken voor, waar gezocht wordt naar verbanden om aardappelopbrengsten te voorspellen (Al-Gaadi et al., 2016; Bala & Islam, 2008; Zaeen et al., 2020; Zha, Y., J. Gao, 2003).

Een indicator voor het analyseren van remote sensing data is bijvoorbeeld Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). De NDVI is meetbaar met behulp van lichtreflectie van zichtbaar licht, ook wel Visible Light (VIs) genoemd en nabij infrarood licht, ook wel Near Infra Red (NIR). Het gewas gebruikt tijdens fotosynthese VIs wat niet terug kaatst in tegenstelling tot NIR. Door de verschillen in lichtreflectie van de gewassen is de inventarisatie van gewasgezondheid mogelijk (*NDVI Kaarten Maken Met Een Drone - Vliegend.Nl*, n.d.). De mate van de vegetatieve dekking en daarmee het blootliggend bodemoppervlak heeft invloed op de reflectie van VIs, NIR en daarmee de vegetatie-index. Vanwege de invloed van de bodem op gewasreflectie is de bodemcorrigerende vegetatie-index Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) ontwikkeld als wijziging op NDVI (Senseman, G.; Tweddale, S.; Bagley, 1996). In het onderzoek van Al-Gaadi et al. (2016) is SAVI toegepast om oogstvoorspellingsalgoritmen te ontwikkelen en opbrengstvoorspellingskaarten te creëren. In het onderzoek van Bala & Islam (2008) is de Leaf Area Index (LAI) onderzocht. LAI meet het bladeroppervlak van het gewas welke functioneert als graadmeter voor het fotosynthesevermogen. Uit onderzoek blijkt dat spectrale metingen sterk gerelateerd zijn aan de bladbiomassa van LAI (Bala & Islam, 2008). De vegetatie-index fPAR (fraction of the incoming absorbed photosynthetically active radiation) meet het aandeel van de beschikbare straling in de specifieke fotosynthetische actieve golflengte. Het is een index die men gebruikt om indices, zoals NDVI, te vertalen naar eenvoudige schattingen van de primaire productie. Het definieert plantlufels niet zo direct als LAI, maar is meer specifiek gerelateerd aan de satellietindices (Bala & Islam, 2008).

Chlorofyl is een plantenpigment dat licht absorbeert tijdens de fotosynthese. De Chlorophyl Index (CI) meet de kwaliteit van de bladeren en geeft een nauwkeurige weergave van de gezondheid van gewassen waardoor het een belangrijke indicator is voor de groei en voedingsstatus. Tijdens de ontwikkelfase en de stikstofopname van gewassen vertoont het bladchlorofylgehalte een goede netto correlatie met fotosynthesesnelheid en fotosynthetische capaciteit. (Zaeen et al., 2020)

Het voorspellen van gewasgroei en opbrengst monitoring van gewassen is een essentiële procedure voor voedselveiligheid en landbouweconomisch rendement. De vorderingen in remote sensing hebben het proces voor monitoring van gewasontwikkeling en opbrengstvoorspellingen verbeterd (Al-Gaadi et al., 2016). Zo zijn in het onderzoek van Al-Gaadi et al. (2016) remote sensing en GIS technieken gebruikt om de aardappelopbrengst te schatten in Saoedi-Arabië. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van wolkvrije satellietfoto's van de landsat-8 en sentinel-2 en zijn de vegetatie-

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$$

Figuur 1 NDVI (Al-Gaadi, et al., 2016)

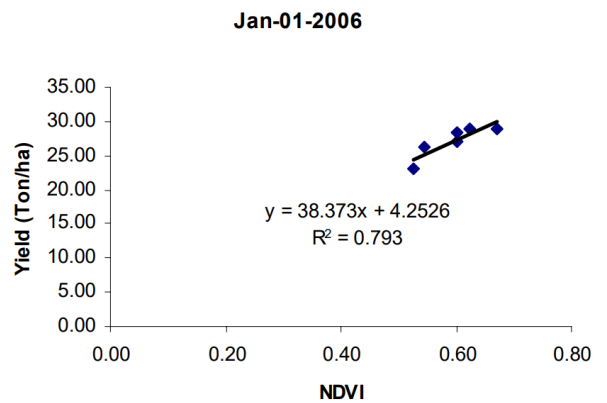
indexen (VIs), NDVI en SAVI toegepast om aardappelopbrengst te voorspellen. De NDVI is berekend met de red (ρRED) en NIR (ρNIR) met de formule in figuur 1.

Een lineaire regressieanalyse toonde aan dat de relatie tussen werkelijke opbrengst en VIs varieerde tijdens de groeiperiode. De hoogste correlatiecoëfficiënt tussen NDVI en opbrengst vond plaats tussen de 60 en 70 dagen na planten (Al-Gaadi, et al., 2016). In de studie van Gómez et al. (2019), met het doel gewasmodelleringstechnieken te verbeteren om aardappelopbrengst te voorspellen, is ook gebruik gemaakt van sentinel-2 foto's. Om de

problemen aan te pakken met de aardappelteelt is er een model ontwikkeld om aardappelopbrengst te voorspellen met remote sensing in Spanje. Naast de informatie van de kleurenbanden waren zeven vegetatie-indices berekend om de gewasstatus juist te beoordelen. NDVI was een van deze indices. Naast LAI is ook NDVI onderzocht in het onderzoek van Bala & Islam (2008) dat plaats vond in Bangladesh. De percelen met aardappelen zijn gedigitaliseerd met behulp van GPS en voor het onderzoek is gebruik gemaakt van wolkvrije satellietbeelden van de Landat-8 en een MODIS (Bala & Islam, 2008). MODIS, of te wel Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer helpt

NDVI te modeleren en samen te voegen met Landsat-afbeeldingen om hoge ruimtelijke resolutie NDVI te bereiken (Filgueiras et al., 2020). Met een regressieanalyse is er een verband gevonden tussen NDVI en aardappelopbrengst. Tijdens het hele groeiseizoen van december tot maart zijn correlatiecoëfficiënten gevonden tussen de 0 en de 0,79. De hoogste correlatiecoëfficiënt (r) is gevonden op de 32^e dag na planten. De sterke relatie tussen de twee variabelen is weergegeven in figuur 2 (Bala & Islam, 2008). De relatie tussen NDVI en aardappelopbrengst is ook onderzocht in het onderzoek van Zaeen et al. (2020). Door kleine verschillen in groeifasen tussen de verschillende locaties, zijn de NDVI-gegevens genormaliseerd met de INSEY-benadering (In-Season Estimate of Yield). Vervolgens is een regressieanalyse toegepast op de data waaruit blijkt, dat de r in de relatie tussen de sensorgegevens en aardappelopbrengst, het hoogste was tussen het 16^e en 20^e bladgroei stadium. De hoogste r van de percelen was gemiddeld 0,38, de waarden van de bladstadia voor de 16^e waren relatief laag (Zaeen et al., 2020).

Zoals verwoord zijn er onderzoeken uitgevoerd naar NDVI in relatie tot aardappelopbrengst in verschillende delen van de wereld en gepubliceerd, maar niet in Nederland. Wel is er een masterthesis gedaan door Nikolaos, (2015). Deze thesis is gericht op het ontwikkelen en evalueren van een methode om aardappelopbrengst te schatten op basis van remote sensing op veldniveau. Het onderzoek had twee doelen; het hele groeiseizoen in tijdstappen analyseren en het analyseren van de relatie tussen NDVI en aardappelopbrengst op basis van DMC's multispectral remote sensing data. Het onderzoek vond plaats in België en het zuiden van Nederland. Voor het analyseren en voorspellen van de opbrengsten binnen het seizoen, werden tijdreeksen van gemiddelde NDVI-waarden verzameld gevolgd door het opstellen van lineaire regressiemodellen voor de relatie. De resultaten van de verschillende jaren gaven vergelijkbare relaties en patronen weer, maar er was wel een tijdsvariatie aanwezig. De tijdsvariatie werd verklaard door verschillende plantdata en contrasterende meteorologische omstandigheden. De maximale correlatie vond plaats tussen 70 en 95 dagen na plant opkomst waarbij de NDVI een sterkt lineair verband vertoonde met aardappelopbrengst met R^2 waarden tussen $R^2=0,67$ en $R^2=0,63$. De resultaten van de thesis tonen



Figuur 2 Opbrengst aardappels in tonnen vs. NDVI (Bala & Islam, 2008)

een goede correlatie tussen NDVI en opbrengst, het is daarentegen niet gepubliceerd waardoor verder onderzoek nodig is om deze resultaten te bevestigen.

NDRE (normalized difference red edge index) is een veel gebruikte gewasindices en is vergelijkbaar met NDVI. NDVI is, zoals eerder verwoord, opgebouwd uit visueel rood licht en NIR. Daarentegen gebruikt NDRE een combinatie van NIR en een lichtfrequentie die tussen NIR en visueel rood licht in zit. De visuele rode band licht dat wordt gebruikt bij NDVI absorbeert het gewas aan de bovenkant van het bladerdak. Hierdoor dragen lagere bladlagen niet bij aan een NDVI-meting wat de correlatie van NDVI beïnvloed. Sommige meerjarige teelten, grassen en graangewassen of gewassen bereiken in latere groeifasen een punt waarop NDVI “verzadigt” met de maximale NDVI-waarde van 1,0. In deze situaties is de variabiliteit in het gewas moeilijk te detecteren met NDVI (*NDVI vs. NDRE: What’s the Difference?* | Sentera, n.d.). Vervanging van de rode band van NDVI door de rode band van NDRE levert een meting op die de bovenste bladlagen minder sterk absorberen waardoor het een beter inzicht kan geven in blijvende gewassen of gewassen in een later bladstadium. NDRE kan dus in sommige situaties een betere meting van variabiliteit bieden in een gebied dat NDVI eenvoudig meet als een uniforme +1,0 (*NDVI vs. NDRE: What’s the Difference?* | Sentera, n.d.).

NDRE is een veelgebruikte gewasindices in gewassen zoals maïs en granen (Li et al., 2015; Marques Ramos et al., 2020). Het koppelen van remote sensing data met gewasgroei is een steeds effectiever hulpmiddel om graanopbrengsten te schatten en te beoordelen op kwaliteit. In het onderzoek van Li et al. (2015) toonde NDRE de meest nauwkeurige selectie van spectrale indices voor het schatten van N-accumulatie in het bladerdak (CNA). In het onderzoek van Marques Ramos et al. (2020) is NDRE met de machine-learning techniek Random Forest (RF) onderzocht om de techniek te verbeteren en maïsopbrengst te voorspellen. De RF-techniek is in het onderzoek gecombineerd met drie individuele vegetatie indices waaronder NDRE wat bij droeg aan een verhoogde opbrengst van de maïs (Marques Ramos et al., 2020). Naast opbrengstvoorspellingen is NDRE ook van toepassing bij het detecteren van stres in een gewas, dit kwam naar voren in het onderzoek van Liu et al. (2019) voor het detecteren van stres in rijst. In een ander onderzoek is NDRE toegepast bij het voorspellen van de opbrengst van wintertarwe. In dat onderzoek zijn NDVI en NDRE gebruikt om de opbrengst, het eiwitgehalte en de totale korrelstikstof te schatten van wintertarwe (Wang et al., 2019).

Zoals eerder verwoord is er geen literatuur bekend waarin de relatie tussen NDRE en aardappel opbrengst is onderzocht. Toch zou NDRE passen bij het schatten van de aardappelopbrengst op basis van de plantgroei. De aardappelplant groeit uit tot een plant met ongeveer 17 bladlagen. In elk blad vindt assimilatie plaats en transport van koolhydraten en sucrose wat de plant omzet in zetmeel. Het aantal bladlagen van de plant is van belang voor de groei van de knollen, en dus de opbrengst (Veerman, 2003). Gewassen met ± 3 bladlagen hebben een NDVI-waarden van 0,7, andere gewassen met meerdere bladlagen hebben een waarden van 0,8 of hoger (Roerink, 2014). Bij een NDVI-waarde van 1,0 kan, zoals eerder verwoord, “verzadiging” optreden waardoor de variabiliteit in het gewas moeilijk te detecteren is met NDVI (Marques Ramos et al., 2020). Hierdoor zou NDRE een betere voorspelling kunnen geven van opbrengst dan NDVI later in het groeistadium, echter is dit nog niet bekend in de literatuur.

1.4 Knowledge gap

Uit de literatuur blijkt dat er verschillende relaties zijn gevonden tussen NDVI en aardappelopbrengst in landen buiten Nederland, met een heel ander klimaat dan in Nederland. Er is geen gepubliceerde literatuur bekend met onderzoek naar de relatie tussen NDVI en aardappelopbrengst, maar wel in een niet gepubliceerde thesis. In de thesis is een vergelijkbare relatie gevonden tussen NDVI en aardappelopbrengst (Nikolaos, 2015).

Uit de literatuur komt naar voren dat NDRE is toegepast voor stres detectie in gewassen en voor opbrengstvoorspellingen. De uitgevoerde onderzoeken met NDRE zijn niet uitgevoerd in Nederland en de onderzochte gewassen zijn geen van allen aardappelen. Over de toepassing van NDRE in relatie tot aardappelopbrengst is dus geen literatuur bekend, terwijl NDRE in theorie wel bij het gewas past zoals beschreven in 1.3. Daarnaast kan NDRE mogelijk een betere voorspelling geven van opbrengst dan NDVI later in het groeistadium.

1.5 Hoofd- en deelvragen

Om de knowledge gap te sluiten zal er onderzoek plaatsvinden. Het onderzoek zal de volgende hoofdvraag beantwoorden:

Zijn er betrouwbare opbrengstvoorspellingen in de aardappelteelt in Nederland te verkrijgen door het gebruik van de indexen NDVI en NDRE en welk effect heeft het gewasgroei stadium daarop?

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- Kan er een betrouwbare opbrengstvoorspellingen gedaan worden door middel van NDVI over aardappelopbrengst in Nederland?
- Kan er een betrouwbare opbrengstvoorspellingen gedaan worden door middel van NDRE over aardappelopbrengst in Nederland?
- Wat is het effect van gewasgroei stadium op de opbrengstvoorspelmodellen van NDVI en NDRE?

1.6 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van precisielandbouwtoepassingen die effectief in te zetten zijn voor een specifieke situatie in op zandgrond Drenthe voor drie verschillende doelgroepen de boer, de loonwerker en het adviesbureau. Voor aardappeltelers die meer inzicht willen in hun teelt, die werken met de data en die opbrengst willen verbeteren. Het is het doel om de verzamelde data te “verwaarden” voor de boer, de loonwerker en het adviesbureau.

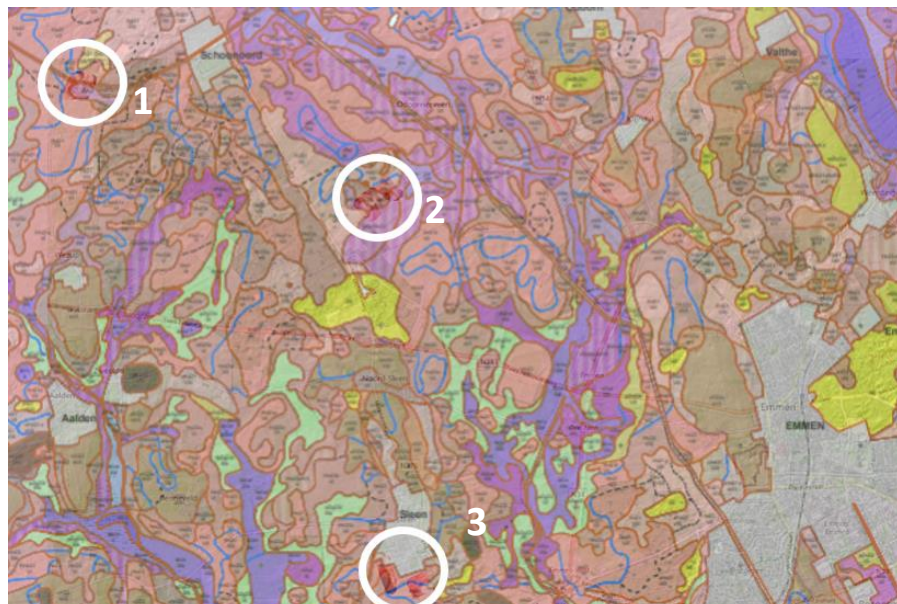
2. Materiaal en methode

In dit hoofdstuk is het materiaal beschreven en de methode voor het uitvoeren van het onderzoek. Het hoofdstuk introduceert eerst de percelen gevolgd door uitleg over het materiaal dat is gebruikt. Daarna is de procedure van het onderzoek beschreven en uitgelegd hoe de data geanalyseerd is.

2.1 Percelen

Om de hoofd en deel vragen te beantwoorden en te onderbouwen is onderzoek van belang en is het juiste materiaal en methode nodig. In samenwerking met de Aeres en de Databoerin nemen drie akkerbouwers deel aan het onderzoek naar de relatie tussen de teelt van

(zetmeel)aardappelopbrengst in tonnen en de gewasindices NDVI en NDRE. Doormiddel van gelijke gewassensoren onder de akkerbouwers zijn gegevens verzameld van 2019. Het onderzoek is uitgevoerd voor zes percelen in de provincie Drenthe in Nederland, in de plaatsen Grolloo, Kibbelveen en Sleen. Deze plaatsen liggen ten westen van de stad Emmen. In figuur 3 is een kaart van Qgis weergegeven met daaroverheen een bodemkaart waarop de locaties van de percelen wit omcirkeld zijn. Het grondsoort waarop de aardappels op zijn geteeld in deze drie plaatsen is zand, maar wel met een verschillende samenstelling. Volgens de bodemkaart heeft Grolloo de gronden zWp en Hn 21, heeft Kibbelveen de gronden zWp en Hn 21 en heeft Sleen de grond Hn21, zie figuur 3 en tabel 1 (Steur & Heijink, 1988).



Figuur 3 Qgis kaart en bodemkaart blad 17 Oost met plaatsen, Grolloo (1), Kibbelveen (2) en Sleen (3) omcirkeld (Qgis, n.d.; Steur & Heijink, 1988)

Tabel 1 Legenda bodemkaart (Steur & Heijink, 1988)

Afkorting	Uitleg
zWp	Moerige podzolgronden met een humushoudend zanddek en een moerige tussenlaag
Hn 21	Veldpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand
Hn 23	Veldpodzolgronden; lemig fijn zand

2.2 Materialen

Zoals verwoord zijn voor het onderzoek opbrengstmetingen gebruikt van het jaar 2019 voor de aardappelen, dit is uitgevoerd met behulp van de YieldMasterPRO op de rooimachine (*YieldMasterPRO Gebruikershandleiding*, 2017). De YieldMasterPRO meet de opbrengst per vier rijen gekoppeld aan GPS-data. De gegevens over NDVI zijn verzameld met behulp van satellietbeelden van de Sentinel-2. De NDRE gegevens zijn ook verkregen via satellietbeelden van de Sentinel-2.

2.3 Procedure

Om de gegevens voor NDVI en NDRE te gebruiken van 2019 zijn eerst de satellietbeelden via het satellietdata-portaal gedownload in het kader van het project. De Sentinel-2 satelliet leverde om de zes dagen beelden op. Vervolgens zijn de beelden gefilterd op wolkvrije beelden. De NDVI en NDRE zijn in dit onderzoek geanalyseerd van zes datums en verdeeld in vier gewasgroeistadia.

De data is voorbereid op de regressieanalyses door meetfouten en outliers (datapunten verder van het gemiddelde verwijderd dan 2,5 maal de standaarddeviatie) te verwijderen.

2.4 Data analyse

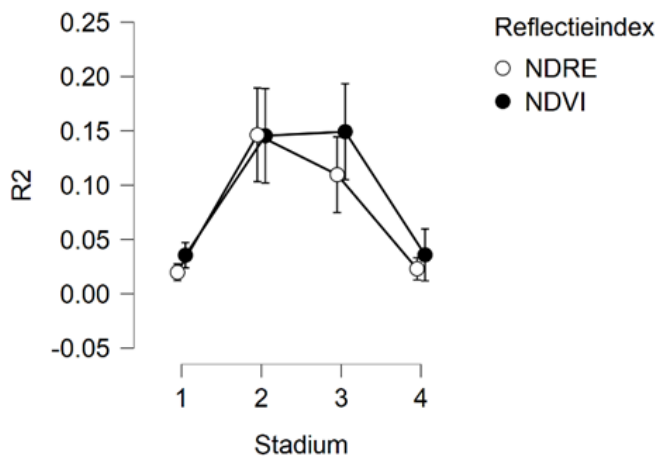
Om de deelvragen te beantwoorden is onderzoek uitgevoerd. Uit de verzamelde data is onderzocht of er verbanden zijn tussen NDVI en aardappelopbrengst, NDRE en aardappelopbrengst en wat voor effect het gewas groeistadia heeft op de NDVI en NDRE resultaten. Om de verbanden te bepalen tussen de gewasindices, NDVI en NDRE, en de gewasopbrengsten, zijn eerst lineaire regressieanalyses uitgevoerd per datum per perceel met het gewasgroeistadia. De gewasstadia zijn verdeeld in vier gewasstadia op basis van de datums van de meettijden. Gewasstadium 1 is 4 weken na het poten, 2 na 15 weken, 3 na 19 weken en 4 na 28 weken.

De gewasreflectiewaarden dienen als predictor en de opbrengst als afhankelijke variabele. De model fits zijn gerepresenteerd door de R-squared (R^2). De verschillen in de R^2 voor NDVI en NDRE modellen zijn getoetst per tijdstip met de mixed design ANOVA. Met behulp van de ANOVA is onderzocht wat het effect van het gewasgroeistadium is op de NDVI en NDRE. Bij het uitvoeren van de ANOVA is de R^2 de afhankelijke variabelen en de opbrengst de onafhankelijke. De gewasindices NDVI en NDRE op de vier tijdstippen zijn de respectievelijk gepaarde en ongepaarde factoren. De alfa is gezet op 0,05 ($\alpha=0,05$) en waar nodig is de Tukey correctie toegepast. De statistische analyses zijn uitgevoerd via het statistische programma JASP.

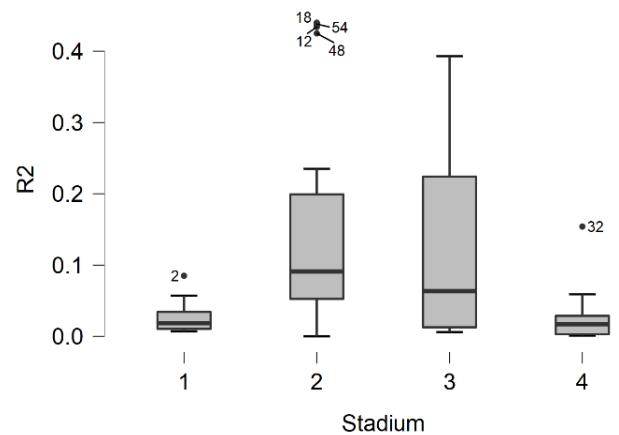
3. Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de resultaten weergegeven van de onderzochte data aan de hand van de materiaal en methode beschreven in hoofdstuk 2. Er zijn lineaire regressieanalyses uitgevoerd met de data en een ANOVA met de R^2 -waarden die zijn voortgekomen uit de lineaire regressieanalyses.

De R^2 -waarden per perceel per datum met de gewasgroeiastadia en gewasreflectie staan weergegeven in bijlage I. De R^2 -waarden uit de afzonderlijke regressieanalyses zijn weergegeven in figuur 4 en in figuur 5. Alle regressieanalyses waren significant ($p < 0,001$), zowel de NDVI als NDRE data. De R^2 -waarden hebben een verloop van laag in stadium 1, naar hoger in stadia 2 en 3, naar wederom laag in stadium 4, zie figuur 4 en 5. Uit de ANOVA bleek er een hoofdeffect van het gewasgroeiastadium [$F(3,64)=4,405$; $p < 0,01$; $\eta^2=0,171$]. Andere effecten waren niet significant (allen $p > 0,05$). Uit verdere post-hoc analyses op het gewasgroeiastadium bleek, na correctie op meervoudige vergelijkingen, enkel een significant verschil in gewasreflectie tussen stadium 1 en 2, en stadium 2 en 4 (beiden $p < 0,05$). Er is dus geen significant verschil tussen NDVI en NDRE.

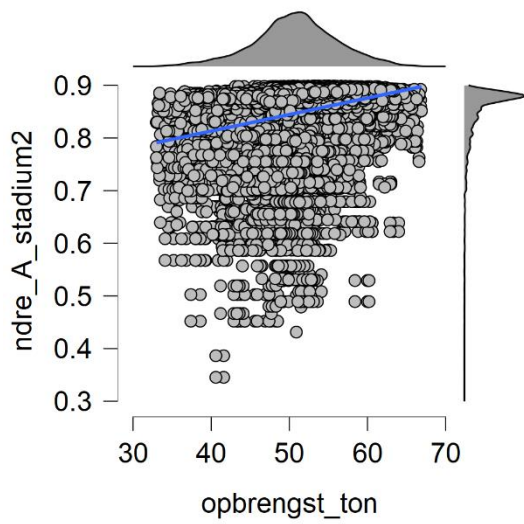


Figuur 4 R^2 -waarden vanuit de regressie analyses tussen gewasgroeiastadium en de gewasreflecties NDVI en NDRE. Foutbalken representeren de afwijking van de gemiddelde ± 1 standaardafwijking

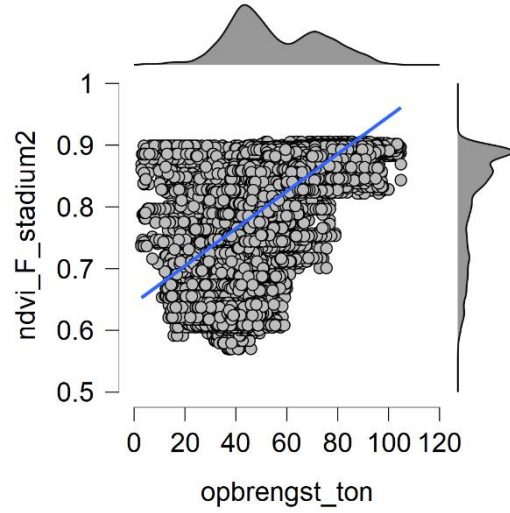


Figuur 5 Boxplot van de R^2 -waarden (NDRE en NDVI samen) tegenover gewasgroeiastadium. De datapunten 12, 18, 48 en 54 zijn van hetzelfde perceel.

Tijdens de bestudering van de data bleek een grote spreiding te bestaan in de NDRE, NDVI en opbrengst gegevens. Om dit te illustreren staat in figuur 6 een representatief perceel weergegeven met NDRE van gewasgroeiastadium 2 tegenover de opbrengst. Daarnaast bleek vooral één perceel een hogere R^2 te hebben dan anderen in stadium 2, zie figuur 5. Dit perceel is ook weergegeven in figuur 7.



Figuur 6 Scatterplot van NDRE in gewasgroei stadium 2 tegenover opbrengst in ton van perceel A



Figuur 7 Scatterplot van NDVI in gewasgroei stadium 2 tegenover opbrengst in ton van perceel F

4. Discussie

Het doel van dit onderzoek was precisielandbouwtoepassingen ontwikkelen die effectief in te zetten zijn voor een specifieke situatie in Drenthe en verzamelde data te “verwaarden”. Om dit doel te behalen is de hoofdvraag opgesteld waarin de vraag is gesteld of er opbrengst voorspellingen in de Nederlandse aardappelteelt te verkrijgen zijn door het gebruik van NDVI en NDRE in verschillende gewasgroeiastadia voor een specifieke situatie in Drenthe.

In lijn met de literatuur zijn er lineaire regressieanalyses uitgevoerd om per datum per perceel R^2 -waarden te verkrijgen. Uit de resultaten blijkt er geen significant verschil aanwezig te zijn tussen de voorspellende waarde van NDVI en NDRE in verschillende gewasgroeiastadia. Wel bleek uit de resultaten dat de voorspellende waarde het grootste is gedurende gewasgroeiastadia 2 (15 weken na poten) en 3 (19 weken na poten), dus midden in het groeiseizoen. Dit komt overeen met de literatuur waarin de hoogste correlatie waarden zijn gevonden midden in het groeiseizoen (Al-Gaadi et al., 2016; Bala & Islam, 2008; Nikolaos, 2015; Zaeen et al., 2020).

De hoogste R^2 -waarden die uit dit onderzoek resulteren zijn lager dan verwacht in vergelijking met de literatuur. In de literatuur zijn R^2 gevonden tot 0,79 tussen de 60^e en de 70^e dag na poten uitgevoerd in Saoedi-Arabië, terwijl in dit onderzoek de hoogste R^2 0,15 is voor NDVI op 15 weken (105 dagen) na poten. In de masterthesis van Nikolaos (2015), uitgevoerd in Nederland, is ook een sterk verband gevonden tussen NDVI en gewasopbrengst met een hoogste R^2 -waarden van 0,67 op 95 dagen na plant opkomst. De afwijking van de masterthesis in vergelijking tot dit onderzoek, is mogelijk te verklaren doordat daar de hoogste R^2 95 dagen na plantopkomst is gevonden en in dit onderzoek 105 dagen na poten. De verdere afwijkingen kunnen mogelijk verklaard worden door het verschil in methode die is toegepast voor het verzamelen van de data van dit onderzoek vergeleken met de literatuur.

Zo is in eerder onderzoek gebruik gemaakt van de draagbare optische sensoren GS (Trimble Navigation Limited) and CC (A-470 sensor, Holland Scientific, Inc.) voor het verzamelen van gewasreflecties. In datzelfde onderzoek van Zaeen et al. (2020) zijn de gewasgroeiastadia verdeeld in zeven categorieën op basis van bladstadia 4 tot en met 20 en verschilt de methode voor het verzamelen van de opbrengstdata. De met de machinaal gerooide aardappelen werden verzameld in zakken, ontdaan van zand en planten resten en gesorteerd. Twee rijen van elk subplot werden geconverteerd en vervolgens gebruikt om de totale opbrengstproductie te berekenen met behulp van de vergelijking van North Dakota en Minnesota. In het onderzoek van Al-Gaadi et al. (2016) is de aardappelopbrengst ook op andere wijze verzameld van drie geselecteerde percelen. In elk van de drie percelen werden van zestig locaties op basis van gestratificeerde willekeurige steekproeven bepaald (60 punten: 45 voor modelgeneratie en 15 voor validatie) voor het verzamelen van de opbrengstdata. De verzameling van de werkelijke aardappelopbrengst werd in dat onderzoek bereikt door de aardappelen over een oppervlakte van drie vierkante meter van elk bemonsteringspunt te oogsten, te wegen en op te schalen naar de gemeenschappelijke opbrengstseenheid. Na het analyseren van de geselecteerde monsters en de bepaling van het drogestof werd 75% van de monsters gebruikt voor het genereren van de modellen en de rest overwogen voor modelvalidatie (Al-Gaadi et al., 2016).

Er is verschil aanwezig tussen percelen waardoor er veel variatie aanwezig is, zoals in figuur 5. Daarentegen beschrijft de literatuur ook verschillen te hebben tussen percelen. Wat verder overeenkomt met de literatuur is het gebruik van wolkvrije sentinel-2 beelden voor het verzamelen van NDVI data. Een verschil met de literatuur, waarbij de R^2 van 0,79 is gevonden, is ook gebruik gemaakt van SAVI. SAVI is een bodem corrigerende vegetatie-index als wijziging op NDVI vanwege

invloed van de bodem op gewasreflectie, dit is niet toegepast in dit uitgevoerde onderzoek. Zo is in een ander onderzoek gebruik gemaakt van MODIS wat helpt NDVI te modeleren en samen te voegen met Landsat-afbeeldingen om hoge ruimtelijke resolutie in NDVI te bereiken, ook MODIS is niet toegepast in dit onderzoek. Zoals verwoord is er veel spreiding in de resultaten in dit onderzoek (zie figuur 6 en 7), mogelijk komt dit doordat de data een betere pre-processing nodig heeft, bijvoorbeeld door gebruik van SAVI en MODIS (Al-Gaadi et al., 2016; Bala & Islam, 2008). De goede pre-processing van de data is een uitdaging om de juiste en gewenste resultaten te behalen. Bij een vervolgend onderzoek zou er meer aandacht besteed moeten worden aan de preprocessing en factoren die invloed hebben op de NDVI en NDRE waarden, zoals die van de bodem.

Het gebruik van NDRE als voorspeller voor gewasopbrengst in (zetmeel)aardappelen is niet beschreven in de literatuur. Wel is NDRE gebruikt voor andere blijvende gewassen, gewassen in een later bladstadium of gewassen met meerdere bladlagen waarbij NDVI verzadigd. In dit onderzoek zijn de NDRE resultaten vergelijkbaar met de NDVI resultaten waardoor blijkt dat de NDRE toepasbaar is voor het schatten van aardappel opbrengst, echter zijn de R^2 -waarden evenals die van NDVI niet hoog. Wel is er bij NDRE evenals bij NDVI een verloop te zien in de verschillende gewasgroeastadia. Vanaf stadium 1 stijgen de R^2 -waarden tot stadium 3 waar het weer daalt naar stadium 4. Het verloop van de data tijdens het groeiseizoen geeft vertrouwen op de functie van de gewasreflecties NDVI en NDRE.

Naar verwachting zou NDRE beter moeten presteren in een later groeistadium dan NDVI aangezien NDVI kan verzadigen na 3 of meer bladlagen en een aardappelplant tot 17 bladlagen heeft. Echter is dit niet zo volgens dit uitgevoerde onderzoek, wat blijkt uit de ANOVA die is toegepast op de R^2 -waarden per gewasstadium, weergegeven in figuur 5. De ANOVA was uit te voeren doordat het proces voor het verzamelen van de R^2 -waarden goed is verlopen. Uit de ANOVA is niet significant aantoonbaar dat NDRE in vergelijking tot NDVI beter presteert in een later bladstadium. Daarnaast is in dit onderzoek ook niet onderzocht of de NDVI werkelijk verzadigd in een later bladstadium. Verder is vanuit de literatuur niet bekend of het gebruik van de ANOVA de juiste methode is om het effect te onderzoeken van het gewasgroeistadium op de opbrengstvoorspellingen van NDVI en NDRE. Daarentegen paste de ANOVA wel het beste op de te onderzoeken data in dit onderzoek.

5. Conclusie en aanbevelingen

Het doel van het onderzoek was het ontwikkelen van precisielandbouwtoepassingen die effectief in te zetten zijn voor een specifieke situatie in Drenthe op zandgrond en verzamelde data te “verwaarden”. Aan de hand van de in hoofdstuk 1 beschreven knowledge gap is de volgende hoofdvraag opgesteld en beantwoord met behulp van de deelvragen:

Zijn er betrouwbare opbrengstvoorspellingen in de aardappelteelt in Nederland te verkrijgen door het gebruik van de indexen NDVI en NDRE en welk effect heeft het gewasgroei stadium daarop?

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- Kan er een betrouwbare opbrengstvoorspellingen gedaan worden door middel van NDVI over aardappelopbrengst in Nederland?
- Kan er een betrouwbare opbrengstvoorspellingen gedaan worden door middel van NDRE over aardappelopbrengst in Nederland?
- Wat is het effect van gewasgroei stadium op de opbrengstvoorspelmodellen van NDVI en NDRE?

Uit de literatuur blijkt dat er betrouwbare opbrengstvoorspellingen gedaan konden worden doormiddel van NDVI. Dit onderzoek toont aan dat, overeenkomend met de literatuur, midden in het groeiseizoen de voorspellende waarden het hoogst zijn (gewasstadium 2 en 3). Daarnaast hebben de hoogste voorspellende waarden een lage R^2 -waarde in dit onderzoek in vergelijking met de bevindingen uit de literatuur.

De voorspellende waarden van NDRE blijkt niet gebruikelijk toegepast te worden in aardappelteelt. Uit dit onderzoek blijkt dat NDRE wel toepasbaar is in de Nederlandse aardappelteelt maar ook lage R^2 -waarden vertoond, net als de R^2 waarden van de NDVI. Daarnaast vertoond de NDRE evenals de NDVI de hoogste R^2 -waarden in de gewasstadia 2 en 3

Naar verwachting zou NDVI in een eerder gewasstadium betere resultaten geven dan NDRE welke een beter resultaat zou opleveren in een later gewasstadium. Echter bleek er in dit onderzoek geen significant verschil te zijn tussen NDVI en NDRE in de gewasstadia.

Aan de hand van de lage R^2 -waarden in vergelijking tot de literatuur en de discussie in hoofdstuk 4, is de adviseren om in vervolg onderzoek de pre-processing van de data te herzien. Dit kan bijvoorbeeld door te onderzoeken of de bodeminvloed heeft op de gewasreflectie waardoor SAVI nodig was in eerdere onderzoeken wat blijkt uit de literatuur. Ook is te adviseren om de methode voor het verzamelen van de gewasopbrengst te herzien aangezien er andere methoden zijn gebruikt in eerdere onderzoeken met hogere R^2 -waarden.

Bronnen

10. *Correlatie en Regressie*. (n.d.). Retrieved April 6, 2021, from <https://www.let.leidenuniv.nl/history/RES/stat/html/les10.html>
- Agrimatie. (2020, November 25). *Grondgebruik*. <https://www.agrimatie.nl/ThemaResultaat.aspx?subpubID=2232&themaID=2286&indicatorID=2911>
- Al-Gaadi, K. A., Hassaballa, A. A., Tola, E., Kayad, A. G., Madugundu, R., Alblewi, B., & Assiri, F. (2016). Prediction of potato crop yield using precision agriculture techniques. *PLoS ONE*, *11*(9), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162219>
- Bala, S. K., & Islam, A. S. (2008). Estimation of potato yield in and around munshiganj using remote sensing NDVI data. *Institute of Water and Flood Management (IWFM), BUET, Dhaka-1000, Bangladesh, March*, 12–14.
- Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A. T., Sanchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Wal, T. Van Der, & Gómez-barbero, M. (2019). Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. *Environmental Science and Policy*, *93*(September 2018), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014>
- Farooque, A. A., Zare, M., Abbas, F., Bos, M., Esau, T., & Zaman, Q. (2020). Forecasting potato tuber yield using a soil electromagnetic induction method. *European Journal of Soil Science*, *71*(5), 880–897. <https://doi.org/10.1111/ejss.12923>
- Filgueiras, R., Mantovani, E. C., Fernandes-Filho, E. I., da Cunha, F. F., Althoff, D., & Dias, S. H. B. (2020). Fusion of MODIS and landsat-like images for daily high spatial resolution NDVI. *Remote Sensing*, *12*(8), 11–13. <https://doi.org/10.3390/RS12081297>
- Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., & Casanova, J. L. (2019). Potato Yield Prediction Using Machine Learning Techniques and Sentinel 2 Data. *Remote Sensing*.
- Kempenaar, C., Dijk, C. van, Hermans, G., Sande, C. van de, Steele-Dun, S., & Verschoore, J. (2019). *Op naar precisielandbouw 2.0*. 144. <https://edepot.wur.nl/501552>
- Kooistra, L., Bartholomeus, H., Lerink, P., & van Valkengoed, E. (2011). *Plaatsspecifiek Perceelmanagement van de Kaart De toepassing van remote sensing beelden voor de karakterisering van gewaspatronen*. 1–44.
- Li, Z., Jin, X., Zhao, C., Wang, J., Xu, X., Yang, G., Li, C., & Shen, J. (2015). Estimating wheat yield and quality by coupling the DSSAT-CERES model and proximal remote sensing. *European Journal of Agronomy*, *71*, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.08.006>
- Liu, M., Wang, T., Skidmore, A. K., Liu, X., & Li, M. (2019). Identifying rice stress on a regional scale from multi-temporal satellite images using a Bayesian method. *Environmental Pollution*, *247*, 488–498. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.024>
- LNV. (2018). *Groei aardappelconsumptie kans voor Nederland*. <https://www.agroberichtenbuitenland.nl/specials/aardappelen/nao>
- Marques Ramos, A. P., Prado Osco, L., Elis Garcia Furuya, D., Nunes Gonçalves, W., Cordeiro Santana, D., Pereira Ribeiro Teodoro, L., Antonio da Silva Junior, C., Fernando Capristo-Silva, G., Li, J., Henrique Rojo Baio, F., Marcato Junior, J., Eduardo Teodoro, P., & Pistori, H. (2020). A random forest ranking approach to predict yield in maize with uav-based vegetation spectral indices. *Computers and Electronics in Agriculture*, *178*(September), 105791. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105791>

- Minder landbouw, meer natuur.* (n.d.). Retrieved March 30, 2021, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/08/minder-landbouw-meer-natuur>
- NDVI kaarten maken met een Drone - Vliegend.nl.* (n.d.). Retrieved April 26, 2021, from <https://www.vliegend.nl/drone-systemen/ndvi-kaarten-maken-met-een-drone/>
- NDVI vs. NDRE: What's the Difference? | Sentera.* (n.d.). Retrieved April 20, 2021, from <https://sentera.com/ndvi-vs-ndre-whats-difference/>
- Nikolaos, T. (2015). *Forecasting and classifying potato yields for precision agriculture based on time series analysis of multispectral satellite imagery* (Vol. 2015). Wageningen University and Research Centre.
- Precisielandbouw - WUR.* (n.d.). Retrieved March 30, 2021, from <https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/dossier-precisielandbouw.htm>
- Roerink, G. (2014). *Nationaal Satelliet Dataportaal Ontsluiting en toepassingen Ontsluiting Ontsluitingsproces.* https://www.groenmonitor.nl/sites/default/files/NSD_ontsluiting%26toepassingen.pdf
- Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (n.d.). *Sicco Mansholt (1908 - 1995), Duurzaam, Gemeenzaam.*
- Senseman, G.; Tweddale, S.; Bagley, C. (1996). Correlation of Land Condition Trend Analysis (LCTA) Rangeland Cover Measures to Satellite Imagery-Derived Vegetation Indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.*
- Steur, G. G. L., & Heijink, W. (1988). *BODEMKAART VAN NEDERLAND Blad 17Oost.*
- Veerman, A. (2003). *Teelt van consumptieaardappelen.* <https://edepot.wur.nl/119908>
- Wang, K., Huggins, D. R., & Tao, H. (2019). Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101921. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101921>
- Wereldaardappelproductie per land - AtlasBig.com.* (n.d.). Retrieved March 30, 2021, from <https://www.atlasbig.com/nl/landen-door-aardappelproductie>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. (2017). *Big Data in Smart Farming – A review.* 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- YieldMasterPRO gebruikershandleiding.* (2017).
- Zaen, A. A., Sharma, L., Jasim, A., Bali, S., Buzza, A., & Alyokhin, A. (2020). In-season potato yield prediction with active optical sensors. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/agg2.20024>
- Zha, Y., J. Gao, and S. N. (2003). Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing.*

Bijlage I R² per datum per perceel van NDVI en NDRE

Datum	Perceel	Stadium	R ² _ndvi	R ² _ndre
13-5-2019	A	1	0,007	0,009
13-5-2019	B	1	0,085	0,0074
13-5-2019	C	1	0,028	0,014
13-5-2019	D	1	0,023	0,011
13-5-2019	E	1	0,017	0,02
13-5-2019	F	1	0,053	0,057
27-7-2019	A	2	0,089	0,079
27-7-2019	B	2	0,091	0,096
27-7-2019	C	2	0,209	0,235
27-7-2019	D	2	0	0
27-7-2019	E	2	0,059	0,086
27-7-2019	F	2	0,434	0,425
30-7-2019	A	2	0,103	0,105
30-7-2019	B	2	0,091	0,079
30-7-2019	C	2	0,196	0,182
30-7-2019	D	2	0,001	0,001
30-7-2019	E	2	0,033	0,03
30-7-2019	F	2	0,44	0,438
24-8-2019	A	3	0,025	0,009
24-8-2019	B	3	0,363	0,207
24-8-2019	C	3	0,175	0,149
24-8-2019	D	3	0,006	0,014
24-8-2019	E	3	0,029	0,011
24-8-2019	F	3	0,393	0,352
26-8-2019	A	3	0,012	0,013
26-8-2019	B	3	0,309	0,254
26-8-2019	C	3	0,096	0,064
26-8-2019	D	3	0,006	0,007
26-8-2019	E	3	0,063	0,022
26-8-2019	F	3	0,314	0,214
10-30-19	A	4	0,001	0,003
10-30-19	B	4	0,154	0,059
10-30-19	C	4	0,022	0,049
10-30-19	D	4	0,015	0,007
10-30-19	E	4	0,003	0,001
10-30-19	F	4	0,02	0,019