

(LA BOD/STUD 2006 0105 'Landverschuivingen')

**“Opstellen van een gevoeligheidskaart
met betrekking tot massabewegingen
(massatransport)
voor de Vlaamse Ardennen”**

Eindrapport

Juli 2007



In opdracht van:

Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie,
Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke
Rijkdommen (Dr. Liesbeth Vandekerckhove)

Door:

Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie
Departement Geografie – Geologie
K.U.Leuven
Geo-Instituut
Celestijnenlaan 200E
B-3001 Heverlee

Dr. M. Van Den Eeckhaut miet.vandeneeckhaut@geo.kuleuven.be
Prof. J. Poesen jean.poesen@geo.kuleuven.be
Prof. G. Verstraeten

De gegevens in dit rapport en in de steekkaarten worden enkel meegedeeld ter informatie. De auteurs bieden geen absolute zekerheid betreffende de volledigheid van de inventariskaart met grondverschuivingen alsook van de afbakening van de zones op de gevoeligheidskaart.

Niets uit dit rapport mag gereproduceerd worden zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteurs Prof. Dr. J. Poesen of Dr. M. Van Den Eeckhaut (Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie, K.U.Leuven). Bij verwijzing naar dit document, gelieve de volgende referentie te gebruiken :

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., 2007. Opstellen van een gevoeligheidskaart met betrekking tot massabewegingen (massatransport) voor de Vlaamse Ardennen. Rapport in opdracht van Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen.

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Achtergrond.....	1
1.2	Doelstellingen.....	1
2	Studiegebied.....	5
2.1	Afbakening van de Vlaamse Ardennen.....	5
2.2	Kenmerken van het studiegebied en de Vlaamse Ardennen.....	5
2.2.1	Lithologie.....	5
2.2.2	Bodems.....	6
2.2.3	Topografie.....	7
2.2.4	Hydrografie.....	7
2.2.5	Bodemgebruik.....	8
3	Toepassing van het model opgesteld voor het 200 km² testgebied op de hele Vlaamse Ardennen (710 km²)	25
3.1	Materialen en methoden.....	25
3.1.1	Logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen voor de aanmaak van een gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in een 200 km ² testgebied in de Vlaamse Ardennen	25
3.1.2	Toepassing van het opgestelde logistisch regressiemodel voor zeldzame gebeurtenissen op het 710 km ² grote studiegebied van de Vlaamse Ardennen	29
3.1.2.A	Aanmaak van basiskaarten en de gevoeligheidskaart	30
3.1.2.B	Validatie van de gevoeligheidskaart door confrontatie met een inventariskaart van grondverschuivingen afgeleid van LIDAR en terreinverificatie	30
3.2	Resultaten en discussie	31
3.2.1	Toepassing van het opgestelde logistisch regressiemodel voor zeldzame gebeurtenissen op het 710 km ² grote studiegebied van de Vlaamse Ardennen	31
3.2.1.A	De gevoeligheidskaart.....	31
3.2.1.B	Validatie van de gevoeligheidskaart door confrontatie met een inventariskaart van grondverschuivingen afgeleid van LIDAR en terreinverificatie	31
3.3	Conclusies	33
4.	Opstellen van een nieuw model ter verbetering van de gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in de Vlaamse Ardennen.....	49
4.1	Inleiding	49

4.2	Materialen en methoden.....	49
4.2.1	Afhankelijke en onafhankelijke variabelen.....	49
4.2.2	Opstellen van een nieuwe gevoeligheidskaart met logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen	50
4.2.3	Validatie van de nieuwe gevoeligheidskaart door confrontatie met terreingegevens	53
4.3	Resultaten	54
4.3.1	De nieuwe gevoeligheidskaart opgesteld met logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen	54
4.3.2	Validatie van de nieuwe gevoeligheidskaart door confrontatie met terreingegevens	56
4.4	Aanbevelingen voor het gebruik van de geklasseerde gevoeligheidskaart	57
4.5	Besluit.....	72
Bibliografie.....		95

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In een vorig project, “Verkennde studie met betrekking tot massabewegingen (massatransport) in de Vlaamse Ardennen” (OL200200162 'Landverschuivingen'), werd een model ontworpen voor het opstellen van een gevoeligheidskaart met betrekking tot massabewegingen in de Vlaamse Ardennen.

Dit model voorspelt op basis van logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen (Eng.: Rare events logistic regression) de kans op het voorkomen van massabewegingen met behulp van terreinhelling, geologie en bodemdrainageklasse.

Het model werd met succes toegepast op een ca. 200 km² deelgebied van de Vlaamse Ardennen (Fig. 1; i.e. deel van Oudenaarde, Maarkedal, Ronse, Kluisbergen, Horebeke en Zwalm).

1.2 Doelstellingen

Dit project beoogt deze gevoeligheidskaart uit te breiden voor de ganse Vlaamse Ardennen (Fig. 1). Naast de reeds bestudeerde 6 gemeenten omvat deze uitbreiding een cluster van 11 gemeenten, i.e. Kruishoutem, Zingem, Gavere, Wortegem-Petegem, Oosterzele, Sint-Lievens-Houtem, Zottegem, Herzele, Brakel, Lierde en Geraardsbergen. Na deze uitbreiding zal de gevoeligheidskaart een gebied van ca. 710 km² bestrijken.

Figuur 1: Situering van het deelgebied (verkennde studie, 2005) en het grotere studiegebied (dit vervolgproject, 2007) in de Vlaamse Ardennen



2 Studiegebied

2.1 Afbakening van de Vlaamse Ardennen

Vanmaercke-Gottigny (1978) omschrijft de Vlaamse Ardennen als het tot interfluviumheuvels versneden plateau tussen de Dender en de Schelde. Een wettelijke afbakening van de Vlaamse Ardennen bestaat echter niet. Het studiegebied van de Vlaamse Ardennen wordt hier omschreven als een cluster van 17 gemeenten (Fig. 1.1), namelijk Kruishoutem, Zingem, Gavere, Oosterzele, Sint-Lievens-Houtem, Wortegem-Petegem, Oudenaarde, Zwalm, Zottegem, Herzele, Kluisbergen, Maarkedal, Horebeke, Brakel, Lierde, Geraardsbergen en Ronse. Op Oosterzele na, behoren alle gemeenten tot het Regionaal Landschap Vlaamse Ardennen. Samen beslaan de 17 gemeenten een oppervlakte van 710 km².

2.2 Kenmerken van het studiegebied en de Vlaamse Ardennen

2.2.1 Lithologie

De lithologische kaart van het studiegebied (Fig. 2.1) toont dat de formatie van Kortrijk als het ware de onderbouw vormt waarop de jongere geologische formaties zijn opgebouwd. Op de kaart omrandt het lid van Aalbeke (KoAa) de jongere formaties. Deze zijn achtereenvolgens de formatie van Tielt, Gent, Lede, Maldegem en Diest. Alle lagen hellen naar het noordnoordoosten met een helling van minder dan 4 m per km. Tabel 2.1 geeft de geologische opbouw van het studiegebied weer. Zeer veralgemeend kan men stellen dat het Tertiair bestaat uit een afwisseling van kleien en zanden (Jacobs et al., 1999a en b). Vooral de kleien van de formatie van Tielt, maar ook deze van het lid van Aalbeke (formatie van Kortrijk) zijn rijk aan smectiet, een kleimineraal dat gevoelig is voor zwellen en krimpen (Mercier-Castiaux en Dupuis, 1990). In het studiegebied werden voor de kleirijke formaties van Gent-Merelbeke, Tielt en Kortrijke-Aalbeke kleigehalten van respectievelijk 55%, 28 tot 34% en 44 tot 55% gemeten (Van Den Eeckhaut, 2006).

Merk op dat hoewel Tabel 2.1 voor de formatie van Tielt onderscheid maakt tussen de leden van Egem en Kortemark en voor de formatie van Gent tussen de leden van Vlierzele en Merelbeke, deze leden niet op elk kaartblad van elkaar onderscheiden werden. Zo wordt de formatie van Gent niet opgesplitst op geologisch kaartblad 29. Hier domineert vermoedelijk het meer zandige lid van Vlierzele en omdat er te weinig gegevens beschikbaar zijn over het meer kleiige lid van Merelbeke werden de twee niet onderscheiden (Jacobs et al., 1999a). Voor de formatie van Tielt was het zowel voor kaartblad 29 als

30 onmogelijk om een eenduidig onderscheid te maken tussen het meer zandige lid van Egem en het meer kleiige lid van Kortemark op basis van bestaande boorbeschrijvingen (Jacobs et al., 1999a en b). In de verkennende studie (Van Den Eeckhaut et al., 2005) werd voor beide formaties geen onderscheid gemaakt tussen de twee aanwezige leden, ook niet in het logistische regressiemodel dat als basis diende voor het opstellen van de gevoeligheidskaart. De reden is echter voor beide formaties verschillend. Wat de formatie van Tielt betreft, kon het onderscheid niet gemaakt worden aangezien de geologische kaarten van het 200 km² testgebied (i.e. delen van kaartbladen 29 en 30) geen onderscheid maken tussen de leden van Egem en Kortemark. Wat de formatie van Gent aangaat, werden de leden van Vlierzele en Merelbeke als één lithologische eenheid beschouwd omwille van het beperkte ruimtelijke voorkomen in het 200 km² grote testgebied en van het feit dat slechts één van de twee kaartbladen (i.e. 30) de leden afzonderlijk weergeeft. Aangezien het ruimtelijk voorkomen van de formatie van Gent veel belangrijker is in het 710 km² grote studiegebied dan in het 200 km² grote testgebied en aangezien voor het overgrote deel van dit groot studiegebied wel informatie beschikbaar is over de twee afzonderlijke leden, zal tijdens dit vervolgproject rekening gehouden moeten worden met de invloed van deze lithologische verschillen in het testgebied en de hele Vlaamse Ardennen op de gevoeligheid voor grondverschuivingen.

Tijdens de ijstijden in het Quartair werden een groot deel van de Tertiaire lagen toegedekt. Het centrale deel van het studiegebied, gelegen tussen de valleien van Schelde en de Dender, behoort tot de zone waar voornamelijk loess werd afgezet. Het gebied ten noordwesten van de Schelde en langsheen deze rivier bevindt zich in het overgangsgebied tussen dekzand en loess (Bogemans, 1999). Enkel het uiterste noordwesten van het studiegebied behoort tot het Dekzandgebied en wordt gekenmerkt door homogene zandige afzettingen aan het oppervlak (Bogemans, 2002).

De dikte van de Quartaire afzettingen op de interfluvia bedraagt gemiddeld 5 m. In de Scheldevallei kunnen de Quartaire afzettingen echter diktes bereiken van 20 tot 25 m. Op steile hellingen zoals deze te Ronse en Kluisbergen kunnen massabeweging (afschuivingen) van aanzienlijke pakketten Quartair materiaal de dikte beïnvloed hebben. (Jacobs et al., 1999a).

2.2.2 Bodems

Figuren 2.2 en 2.3 geven een vereenvoudigd beeld van de bodems in het studiegebied. Net zoals bij de Belgische bodemkartering werden de bodems in de eerste plaats geklasseerd volgens de korrelgrootte (Fig. 2.2). De correlatie met de Quartaire eolische sedimenten is groot. Zandleem- en leembodems overheersen in het studiegebied. De zandleembodems komen vooral in de vlakte van de Schelde en de Dender en ten noordwesten van de Schelde voor, terwijl de leembodems in de heuvelachtige gebieden

tussen de Schelde en de Dender aangetroffen worden. In de valleien van de Schelde en de Dender en in de beekvalleien bevindt zich alluviale klei. Zandbodems zijn er in het noordwestelijke deel van het studiegebied, op de hoogste toppen van de Tertiaire heuvelruggen waar de zanden van de formatie van Diest dagzomen en langs de valleirand van de Schelde. In het laatste geval gaat het om dekzandruggen die tijdens de Dryas gevormd werden (I.W.O.N.L.,1987).

Figuur 2.3 geeft de ruimtelijke spreiding van de bodemdrainageklassen weer. Grondverschuivingen komen vaak voor in gebieden met een gebrekkige drainage. Daarom is kennis van de ligging van matig en slecht gedraineerde bodems belangrijk. Ook de locaties met een kleirijk substraat op minder dan 1,2 m van het bodemoppervlak zijn aangeduid. De aanwezigheid van deze minder doorlatende laag kan namelijk zorgen voor waterstagnatie en kan eveneens dienst doen als een potentieel schuifvlak. Tot slot zijn ook de vergraven of verschoven terreinen aangeduid, omdat deze locaties een indicatie kunnen zijn voor de aanwezigheid van een oude grondverschuiving.

2.2.3 Topografie

Het typische heuvelachtige karakter van de Vlaamse Ardennen is duidelijk zichtbaar op een digitaal hoogtemodel (DHM) van het studiegebied (Fig.2.4) en de hiervan afgeleide schaduwkaarten (Fig. 2.5 en 2.6). Het reliëf is duidelijk meer uitgesproken ten oosten van de Schelde. De hoogte varieert er van 10 m in de Scheldevallei tot 150 m op de Hotondberg. Dit is één van de toppen van de west - oost gerichte heuvelrug die in het zuiden van het studiegebied gelegen is. Vanuit deze west - oost georiënteerde heuvelrug vertrekken verschillende, lagere secundaire heuvelruggen zoals de Kwaremont en de Paterberg.

De meeste hellingen hebben een gradiënt tussen 0 en 20 % (Fig. 2.7). De vallei-asymmetrie die reeds opgemerkt werd door Vanmaercke-Gottigny (1978, 1980) is zichtbaar op het DHM en de hellingkaart. De hellingen met een oriëntatie naar het zuiden, het zuidwesten, het westen, en het noordwesten zijn duidelijk steiler dan de overige hellingen.

2.2.4 Hydrografie

De meeste van de vele valleitjes die op het DHM (Fig. 2.4) te onderscheiden zijn, worden gedraineerd door een beek. De Vlaamse Ardennen worden gekenmerkt door een hoge drainage dichtheid. Voor het 200 km² grote testgebied werd tijdens de verkennende studie de drainagedichtheid (i.e. de verhouding van de totale lengte van de op basis van de digitale topografische kaart (1:10 000) gedigitaliseerde

waterlopen tot de totale oppervlakte van het testgebied) berekend als ongeveer 1,1 km per km². Deze waarde is gelijkaardig aan de waarde die Vanmaercke-Gottigny (1967; i.e. 1,2 km per km²) rapporteerde voor het Zwalmbekken. Voor het 710 km² grote studiegebied is de drainagedichtheid lager dan in het testgebied, aangezien de dichtheid van het rivierenpatroon ten noordwesten van de Schelde lager is dan in de rest van het studiegebied.

De intense reliëfinsnijding is het gevolg van bronwerking (Vanmaercke-Gottigny, 1967). De eerder vermelde afwisseling van goed doorlaatbare zandige lagen en minder doorlaatbare kleirijke lagen zorgt namelijk voor het ontstaan van hangende watertafels. Wanneer de topografie deze watertafels snijdt, ontstaan bronnen.

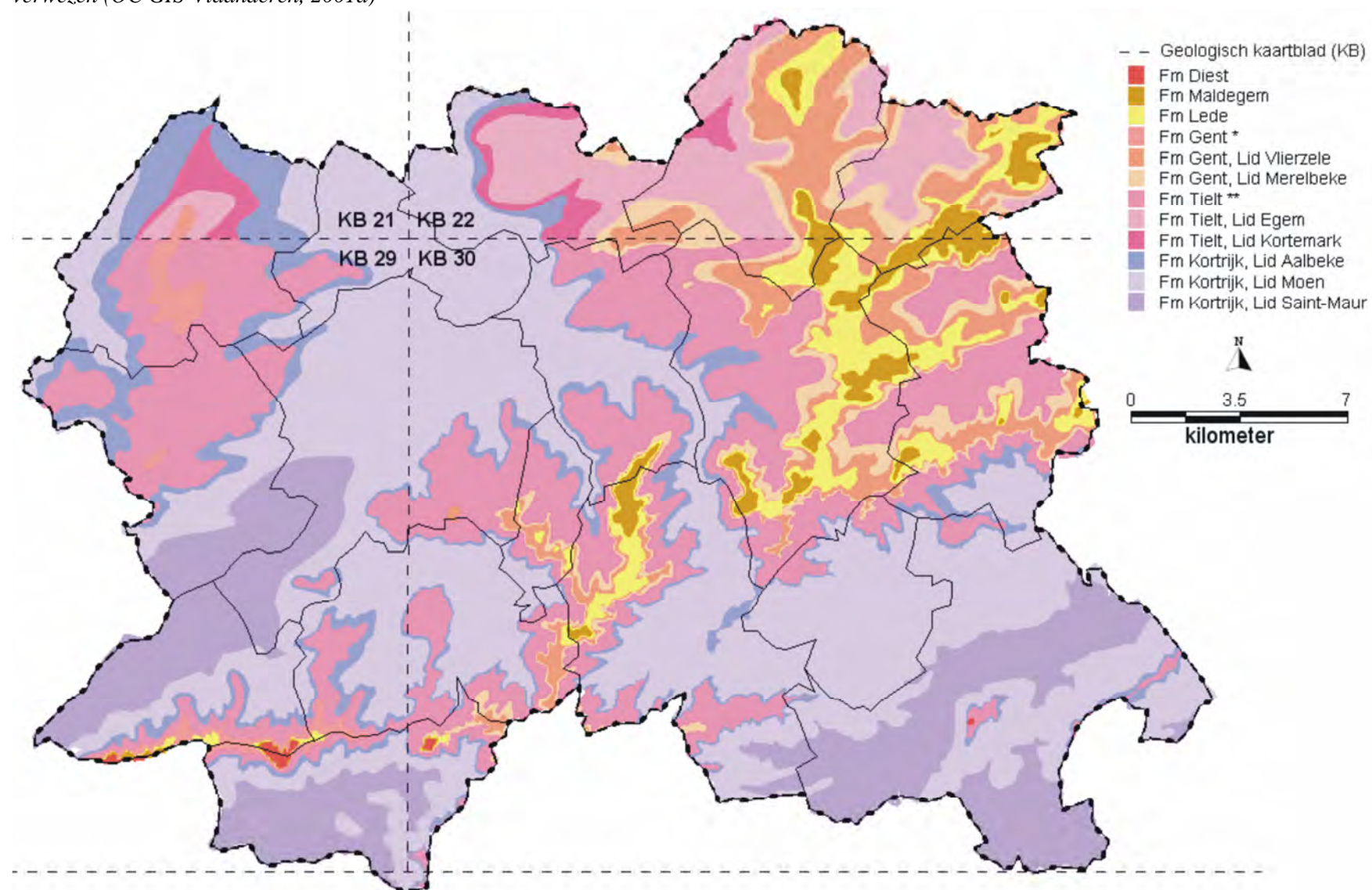
2.2.5 Bodemgebruik

Het zijn vooral natuurlijke eigenschappen als de waterhuishouding en de korrelgroottesamenstelling van de bodem die het actuele bodemgebruik van een bepaalde site bepalen. Op diepe leem- en zandleemgronden met een gunstige drainering en op de zandlemige oeverwalgronden in de Scheldevallei worden de akkers aangetroffen. Weiland domineert in de vallei van de Schelde, in talrijke beekvalleien en in natte depressies. Daarnaast worden ook weiden aangetroffen op steile hellingen, op natte plateau-gronden en rond grote boerderijen (i.e. huisweiden). Gronden die door hun ongunstige topografische ligging en bodemgesteldheid (o.m. zandgronden, substraatgronden of gronden ter hoogte van bronniveaus) niet in aanmerking komen voor akker- of weidebouw zijn bebost. Ook goed gedraineerde, maar sterk geaccidenteerde zandleemgronden liggen vaak onder bos (I.W.O.N.L., 1987).

Tabel 2.1: De lithologische opbouw van de Vlaamse Ardennen. NA: niet aanwezig in het studiegebied (Jacobs et al., 1999a; Jacobs et al., 1999b).

	Chronostratigrafie (10 ⁶ jaren)	Lithostratigrafie		Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	
		Formatie	Lid			
TERTIAIR	Pliocen (5.4-1.77)	NA	NA	NA	NA	
	Mioceen (23.8-5.4)	Diest (Di)		Bruinrood geoxideerd, glauconiethoudend zand	2 tot 3	
	Oligoceen (33.6-23.8)	NA	NA	NA	NA	
	Eoceen (54.8-33.6)	Maldegem (Ma)	Ursel (MaUr)	Asse (MaAs)	Homogene blauwe klei en glauconiethoudend zandige klei	2 tot 3
			Lede (Ld)			
		Gent (Ge)	Vlierzele (GeVl)		Grijsgroen glauconiethoudend fijn zand	5
			Merelbeke (GeMe)		Donkergrijze klei	5
		Tielt (Tt)	Egem (TtEg)		Glimmer- en glauconiethoudend kleiig grijsgroen zand, met kleilagen	20 tot 30
			Kortemark (TtKo)		Grijsgroene klei tot silt	
		Kortrijk (Ko)	Aalbeke (KoAa)		Homogene blauwe zware klei	10
			Moen (KoMo)		Kleiige grove silt tot fijn zand met kleilagen	45
			St.-Maur (KoSm)		Zeer fijn siltige klei	27
			Mont-Héribu (KoMh)		Glauconiethoudende kleiige zanden of zandige kleien	10
Paleoceen (65-54.8)	NA	NA	NA	NA		

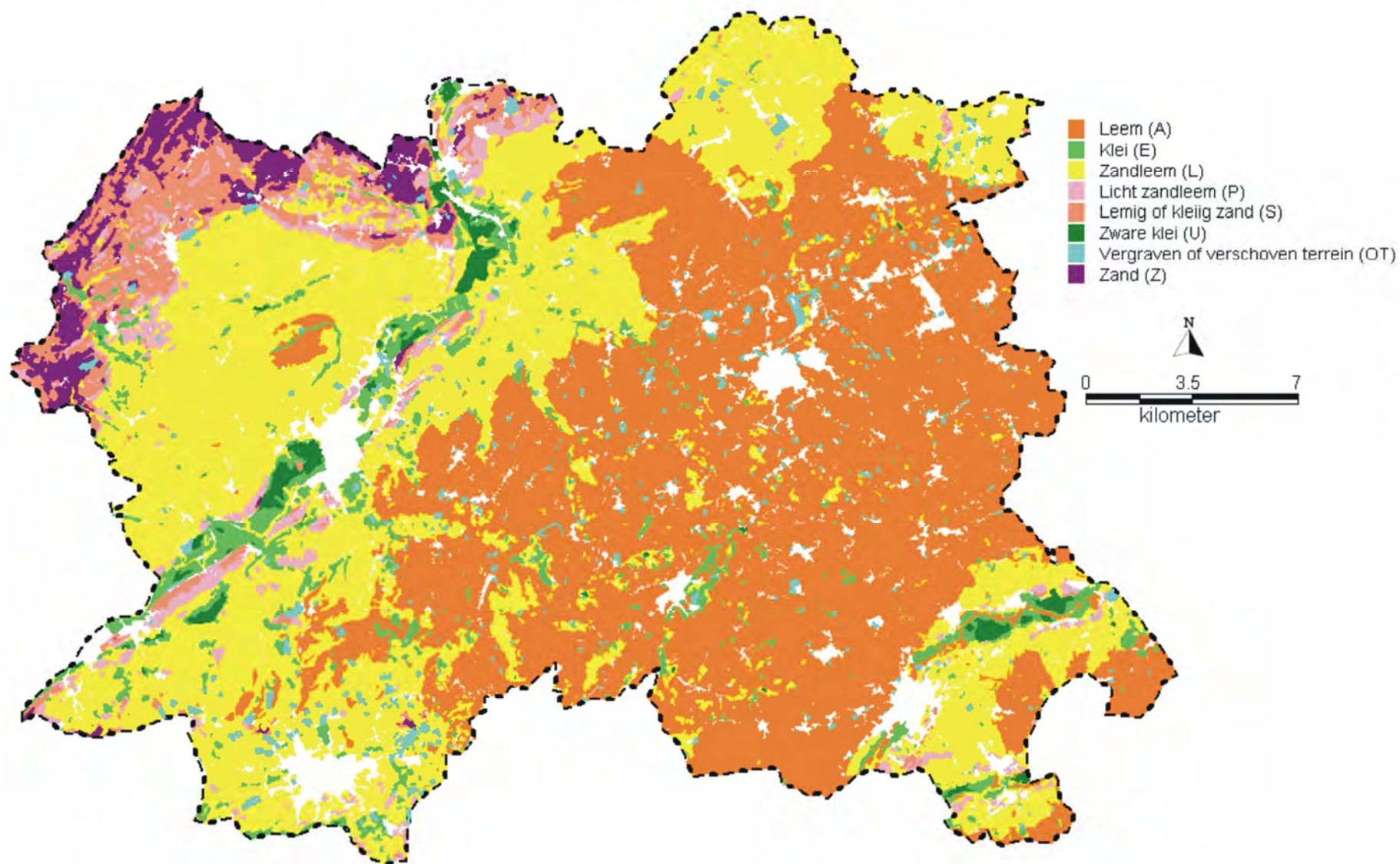
Figuur 2.1: De geologische formaties in het studiegebied. Voor meer informatie omtrent de lithologie van de verschillende formaties wordt naar tabel 2.1 verwezen (OC GIS-Vlaanderen, 2001a)



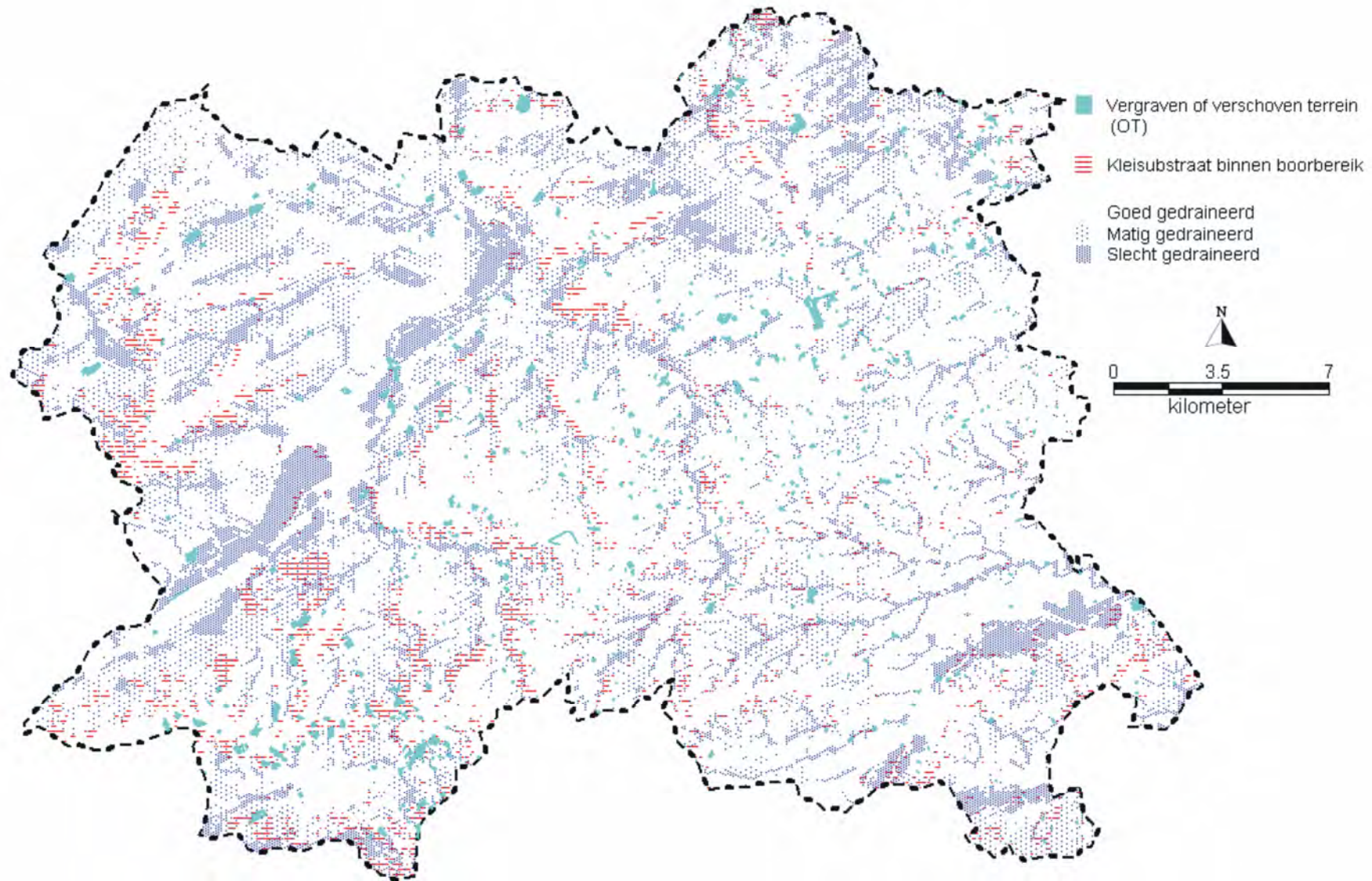
* Op KB 29 wordt geen onderscheid gemaakt tussen de leden van Vlierzele en Merelbeke

** Op KB 29 en 30 wordt geen onderscheid gemaakt tussen de leden van Egem en Kortemark

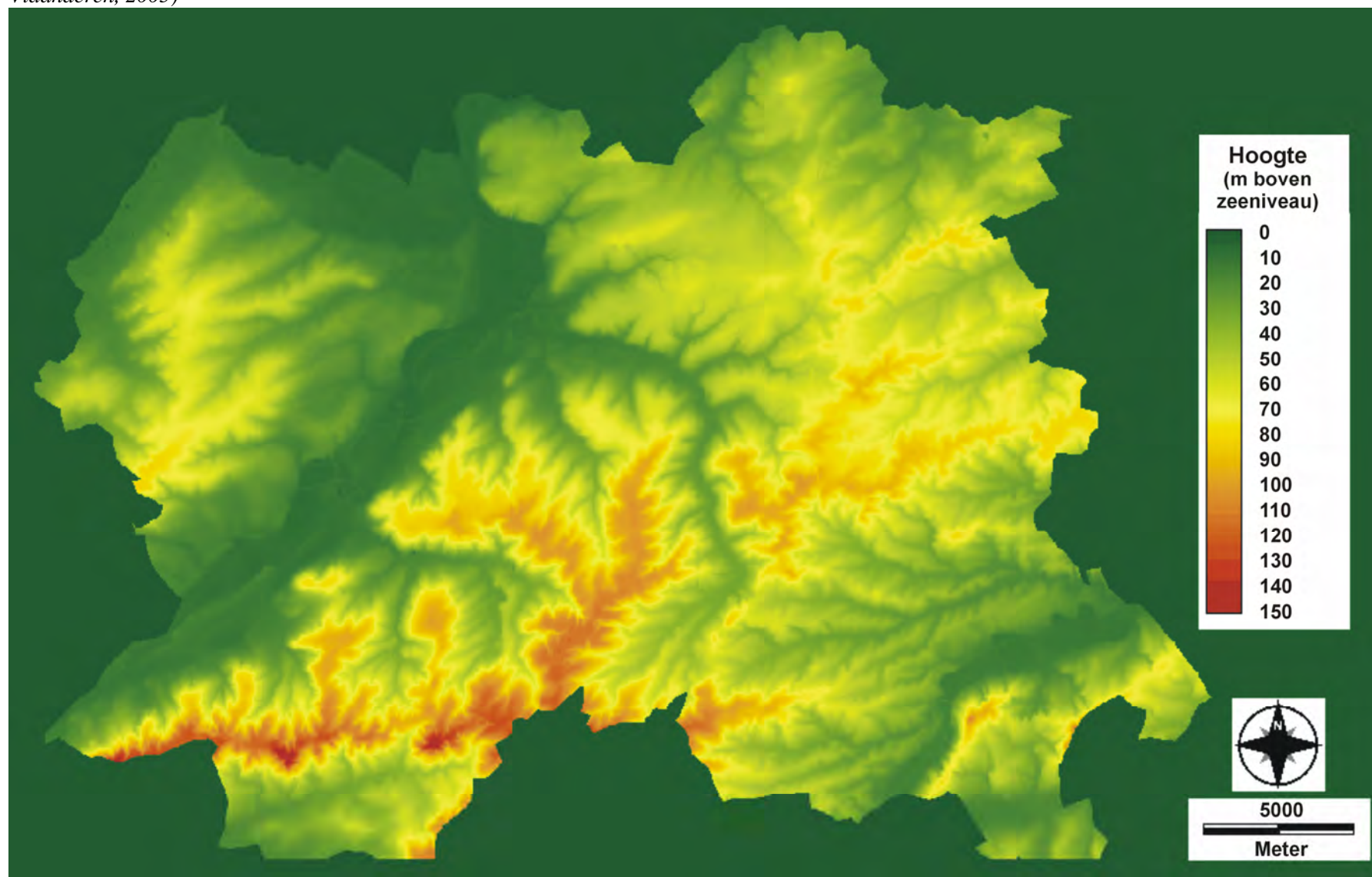
Figuur 2.2: Ruimtelijke spreiding van de bodemtexturen in het studiegebied (OC GIS-Vlaanderen, 2001b)



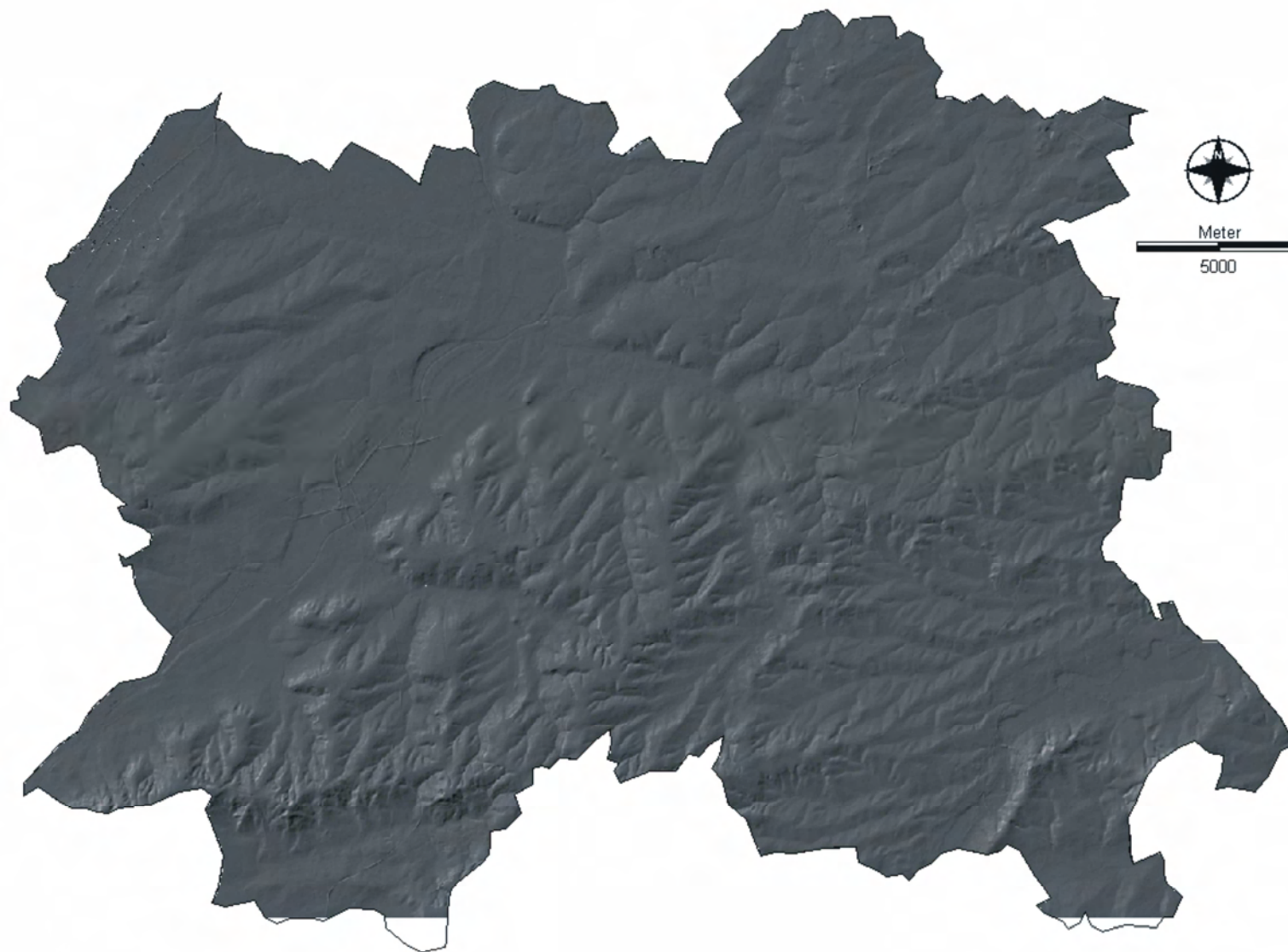
Figuur 2.3: Ruimtelijke spreiding van de bodemdrainage in het studiegebied. Locaties waar een kleisubstraat voorkomt binnen boorbereik en verschoven of vergraven terreinen worden ook weergegeven (OC GIS-Vlaanderen, 2001b)



Figuur 2.4: Het reliëf in de Vlaamse Ardennen. Digitaal Terreinmodel op basis van laserscanning of LIDAR (Light Detection and Ranging; OC GIS-Vlaanderen, 2005)



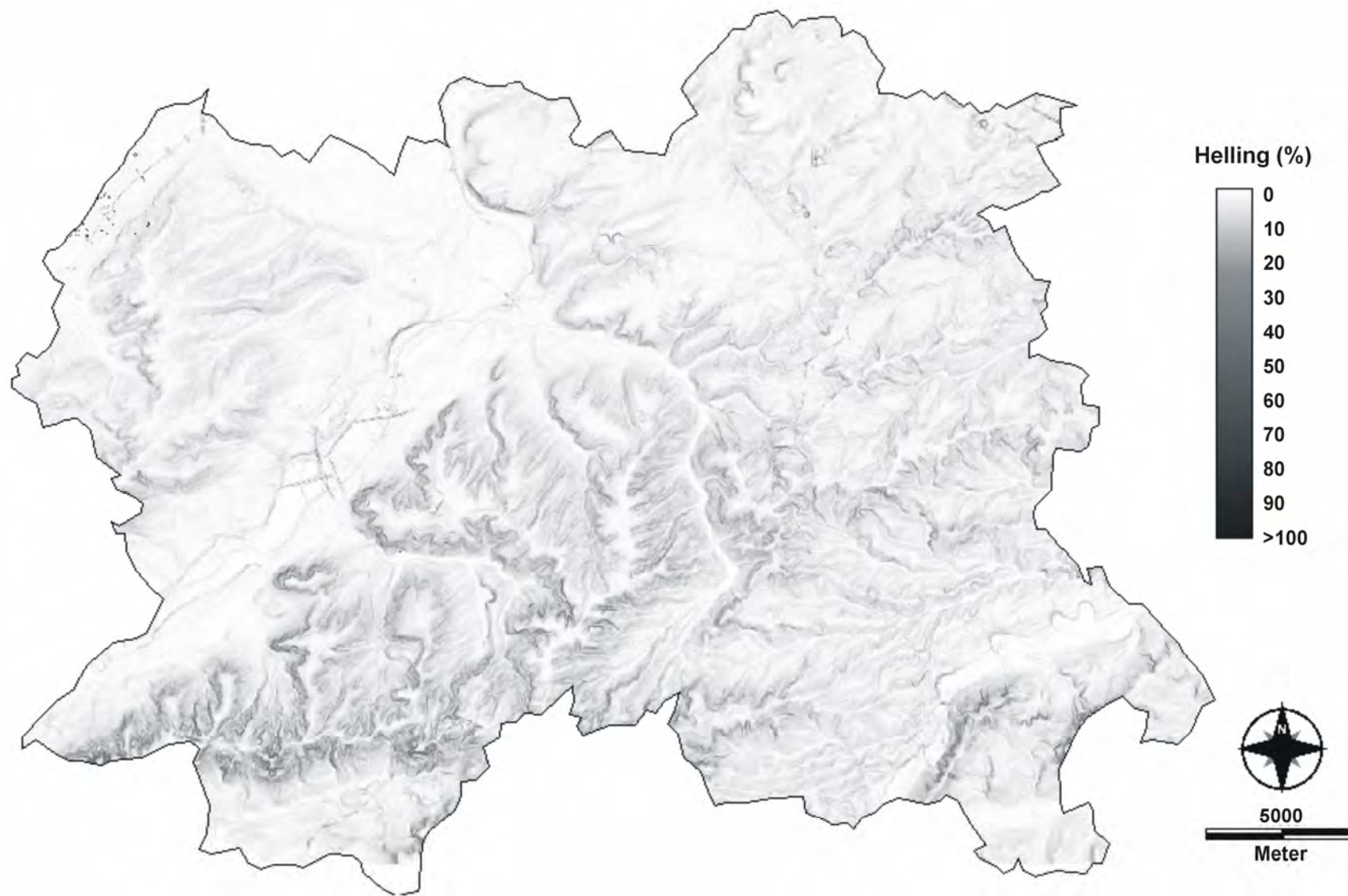
Figuur 2.5: Schaduwwaart van de Vlaamse Ardennen. De lichtbron bevindt zich ten noordwesten van het kaartblad. Digitaal Terreinmodel op basis van laserscanning of LIDAR (Light Detection and Ranging; OC GIS-Vlaanderen, 2005)



Figuur 2.6: Schaduwkaart van de Vlaamse Ardennen. De lichtbron bevindt zich ten noordoosten van het kaartblad. Digitaal Terreinmodel op basis van laserscanning of LIDAR (Light Detection and Ranging; OC GIS-Vlaanderen, 2005)



Figuur 2.7: Hellingen in de Vlaamse Ardennen. Digitaal Terreinmodel op basis van laserscanning of LIDAR (Light Detection and Ranging; OC GIS-Vlaanderen, 2005)



3 Toepassing van het model opgesteld voor het 200 km² testgebied op de hele Vlaamse Ardennen (710 km²)

3.1 Materialen en methoden

3.1.1 Logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen voor de aanmaak van een gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in een 200 km² testgebied in de Vlaamse Ardennen

Deze tekst is gebaseerd op Van Den Eeckhaut et al. (2006).

Om de gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen aan te maken, werd tijdens het project “Verkenkende studie met betrekking tot massabewegingen (massatransport) in de Vlaamse Ardennen” (OL200200162 'Landverschuivingen') gebruik gemaakt van een meervoudig statistisch model, namelijk logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen. Logistische regressie mag enkel uitgevoerd worden wanneer de onafhankelijke variabelen (zie Tabel 5.1 in Van Den Eeckhaut et al., 2005) niet multicollinear zijn. Multicollineariteit doet zich voor wanneer één onafhankelijke variabele een (bijna) lineaire combinatie is van de overige onafhankelijke variabelen (<http://v8doc.sas.com/sashtml/>; Vanneste, 1999). Dit houdt in dat een bepaalde variabele bekomen kan worden door een veelvoud en/of een som te nemen van andere onafhankelijke variabelen. In dat geval komt de betrouwbaarheid van het model in gevaar en is er een dalende significantie van de berekende parameters. Collineariteit werd opgespoord door in SAS de tolerantiewaarde (TOL) en de variantie inflatie factor (VIF) te bepalen en te evalueren. Variabelen waarvoor een TOL-waarde kleiner dan 0,40 en een VIF-waarde groter dan 2 werd bekomen (i.e. absolute hoogte boven zeeniveau en kromming in profiel), werden verwijderd uit de verzameling van onafhankelijke variabelen en kwamen aldus niet in aanmerking om opgenomen te worden in het logistisch model.

Het gebruik van logistische regressie voor het voorspellen van locaties die gevoelig zijn voor grondverschuivingen heeft 3 belangrijke voordelen: (1) de mogelijkheid om categorische variabelen te gebruiken, (2) het feit dat de onafhankelijke variabelen niet normaal verdeeld moeten zijn en (3) het binaire karakter van de afhankelijke variabele (Allison, 2001). Dit laatste houdt in dat een afhankelijke variabele, hier voorgesteld door Y, slechts twee mogelijke waarden kan hebben (Y=0 voor geen grondverschuiving en Y=1 voor grondverschuiving). De onafhankelijke variabelen kunnen dus zowel numerische als categorische variabelen zijn. Deze laatste groep moet wel omgezet worden in tweedelige variabelen of dummy variabelen. Om de bovenvernoemde multicollineariteit te vermijden moet steeds één categorie weggelaten worden. Een voorbeeld illustreert dit het best. Lithologie omvatte 8 categorieën (zie Tabel 5.1 in Van Den Eeckhaut et al., 2005). Deze werden in de analyse

vervangen door 7 dummy variabelen. De formatie van Gent (Ge) werd als referentie lithologie gekozen. Dit betekent dat de 7 dummy variabelen binaire variabelen zullen zijn met een waarde 1 voor achtereenvolgens Di, Ma, Ld, Tt, KoAa, KoMo en KoSm en een waarde 0 voor alle overige lithologieën. De overige referentiecategorieën zijn noordwest (NW) voor oriëntatie van de helling, en droge leembodem (DL) voor bodem (zie tabel 5.1 in Van Den Eeckhaut et al., 2005).

Stel dat X een vector van n onafhankelijke variabelen x_1, x_2, \dots, x_n en $\hat{p} = \Pr(Y=1)$ is de kans op het voorkomen van een grondverschuiving, dan kan het lineair logistisch model als volgt genoteerd worden:

$$\log\left(\frac{\hat{p}}{1-\hat{p}}\right) = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_n x_n = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X \quad (1)$$

met $\hat{\alpha}$ het intercept en $\hat{\beta}_i$ de coëfficiënten van de onafhankelijke variabelen. $\hat{p}/1-\hat{p}$ wordt de kansverhoudingsratio (Eng.: odds ratio) genoemd en de logaritme van de odds ratio, $\log(\hat{p}/1-\hat{p})$, de logit.

Bovenstaande vergelijking (1) laat ons toe de kans op een grondverschuiving te berekenen als:

$$\hat{p} = \frac{1}{1 + e^{-(\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot X)}} \quad (2)$$

Tegenwoordig wordt logistische regressie vaak gebruikt bij het maken van gevoeligheidskaarten voor grondverschuivingen (Carrara et al., 1992; Vanacker et al., 2003; Ayalew en Yamagishi, 2005). Wat echter vaak over het hoofd wordt gezien, is dat de door grondverschuivingen aangetaste hellingen in vele gebieden slechts een beperkte oppervlakte beslaan in vergelijking met de totale oppervlakte van het studiegebied. In termen van pixels houdt dit in dat de afhankelijke variabele (Y , de af- of aanwezigheid van grondverschuivingen) honderd tot enkele duizenden keer meer 0-waarden dan 1-waarden heeft. Het gebruik van de standaard logistische regressie bij dergelijke zeldzame gebeurtenissen (Eng.: rare events) leidt tot een aanzienlijke onderschatting van de kans op het voorkomen van een grondverschuiving (King en Zeng, 2001). King en Zeng (2001) introduceerden daarom “logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen” (Eng.: rare event logistic regression). Hierbij wordt door het inbouwen van drie aanpassingen rekening gehouden met het zeldzame karakter van de afhankelijke variabele.

De eerste aanpassing situeert zich reeds bij de selectie van een representatieve steekproef. In plaats van een toevallige steekproef (Eng.: stratified random selection) te nemen *van* de afhankelijke variabele, wordt er een toevallige steekproef genomen *binnen* de 2 categorieën van de afhankelijke

variabele (Eng.: case-controlled selection). In de verkennende studie werd van elke grondverschuiving met een diep schuifvlak (n=116) slechts één pixel gebruikt in de analyse om ruimtelijke autocorrelatie te verhinderen (Tabel 3.1). Samen met de centrale pixel van de erosiezone van iedere grondverschuiving vormde een toevallige selectie van 580 pixels gelegen buiten één van de 116 grondverschuivingen de steekproef die voor de calibratie en validatie van het logistisch model werden gebruikt. Er werden dus ongeveer 5 keer meer pixels zonder grondverschuiving opgenomen in de steekproef. Ongeveer 80% van de pixels (93 met waarde 1 en 465 met waarde 0) behoorden tot de calibratie dataset. De overige 20% van de pixels (23 met waarde 1 en 115 met waarde 0) werden gebruikt voor de validatie van het gecalibreerde logistisch model.

Deze selectiewijze noodzaakte een tweede aanpassing. “Case-controlled sampling” zorgde namelijk voor een systematische fout (Eng.: bias) op het intercept en de coëfficiënten van het logistisch model (King en Zeng, 2001). Voor de coëfficiënten was deze fout eerder beperkt, maar voor het intercept mocht deze niet verwaarloosd worden. King en Zeng (2001) gebruiken vooraf gekende informatie omtrent de verhouding van enen in de populatie (τ) en de verhouding van enen in de steekproef (\bar{y}) om het intercept te corrigeren. Deze aanpassing die “Prior correction” genoemd wordt omwille het gebruik van vooraf gekende informatie ziet er als volgt uit:

$$\alpha = \hat{\alpha} - \ln \left[\left(\frac{1-\tau}{\tau} \right) \left(\frac{\bar{y}}{1-\bar{y}} \right) \right] \quad (3)$$

Voor de verkennende studie werd $\tau = 116/1971990$ (i.e. het aantal centrale pixels van erosiezones van grondverschuivingen tot het totaal aantal pixels in het studiegebied; zie opmerking paragraaf 4.2.2) en $\bar{y} = 1/5$ gebruikt.

Een derde aanpassing hield rekening met de onderschatting van de met vergelijking (2) berekende kanswaarden door de verwaarlozing van de onzekerheid op de geschatte coëfficiënten. King en Zeng (2001) gebruiken een correctiefactor C_i en berekenen de uiteindelijke kanswaarden als volgt:

$$\Pr(Y_i=1) = \tilde{p}_i + C_i \quad (4)$$

Waarbij voor iedere pixel de correctiefactor C_i bepaald wordt als

$$C_i = (0.5 - \tilde{p}_i) \tilde{p}_i (1 - \tilde{p}_i) X'V(\beta)X \quad (5)$$

Met \tilde{p}_i de kans op het voorkomen van een grondverschuiving, berekend met formule (2) waarbij het door middel van formule (3) gecorrigeerde intercept gebruikt wordt; X de vector met de waarden voor

de onafhankelijke variabelen in een bepaald punt, X' de getransponeerde vector van X en $V(\beta)$ de variantie-covariantiematrix.

Deze methode resulteerde voor het 200 km² grote testgebied in de Vlaamse Ardennen in een model dat voornamelijk gebaseerd was op de aanwezigheid van relatief steile pre-grondverschuivingshellingen en kleirijke lithologiën zoals de formatie van Tielt en de leden van Aalbeke en Moen van de formatie van Kortrijk. Het oorspronkelijke model bevatte ook de aanwezigheid van ‘zeer natte bodems’ als onafhankelijke variabele. In tegenstelling tot de overige factoren die allemaal een positieve bijdrage leverden aan de gevoeligheid van een site voor grondverschuivingen, leverden zeer natte gronden een negatieve bijdrage omdat het voornamelijk vlakke alluviale gronden betrof. Omwille van de ligging in vlakke gebieden van deze zeer natte alluviale gronden en het feit dat er daar geen grondverschuivingen verwacht worden, is de aanwezigheid van zeer natte gronden irrelevant voor het model en daarom werd na het afwerken van de verkennende studie verkozen om een nieuw model op te stellen zonder deze natte alluviale gronden. De logit (1) van dit model is:

$$\begin{aligned} \log(\hat{p}/1 - \hat{p}) = & -23,76 \\ & + (0,46 \times \text{pre-grondverschuiving hellingsgradiënt}) \\ & + (6,87 \times Tt) \\ & + (8,99 \times KoAa) \\ & + (6,77 \times KoMo) \end{aligned} \tag{6}$$

met Tt de formatie van Tielt; $KoAa$ de formatie van Kortrijk Lid van Aalbeke; $KoMo$ de formatie van Kortrijk Lid van Moen. Tt , $KoAa$ en $KoMo$ zijn binaire variabelen die een waarde 1 (0), hebben indien die bepaalde lithologische eenheid aanwezig (afwezig) is.

Substitutie van relatie (6) in relatie (2) liet vervolgens toe om de ongecorrigeerde kans op het voorkomen van een grondverschuiving (\tilde{p}_i) te bereken. Met relatie (5) en kennis van variantie-covariantiematrix $V(\beta)$:

$$\begin{pmatrix} 4,6396 & -0,1006 & -2,6481 & -3,3167 & -2,7935 \\ -0,1006 & 0,0030 & 0,0405 & 0,0607 & 0,0449 \\ -2,6481 & 0,0405 & 1,9728 & 2,1146 & 1,9036 \\ -3,3167 & 0,0607 & 2,1146 & 2,7642 & 2,2024 \\ -2,7935 & 0,0449 & 1,9036 & 2,2024 & 2,2130 \end{pmatrix}$$

kon voor iedere pixel de correctiefactor C_i berekend worden. Zodat uiteindelijk de gecorrigeerde kans op het voorkomen van een grondverschuiving ($\Pr(Y_i=1)$) berekend werd met relatie (4). De logistische regressie zoals hierboven beschreven werd uitgevoerd met de “relogit” module in Zelig, een programma in R (Imai et al., 2005).

Het bekomen logistisch regressiemodel werd vervolgens toegepast op de 138 pixels (23 met grondverschuiving en 115 zonder grondverschuiving) van de validatieset. Deze 138 pixels werden voor verschillende cut-off waarden (= kritische kanswaarde; pixels met een kanswaarde groter dan de cut-off waarde worden als een grondverschuiving pixel beschouwd, terwijl pixels met een kanswaarde kleiner dan de cut-off waarde als een niet-grondverschuiving pixel zullen worden beschouwd) geklasseerd. De beste combinatie van correct voorspelde grondverschuiving en niet-grondverschuiving pixels werd bekomen voor een cut-off waarde van 0,00005. Bij deze kritische kanswaarde werden slechts 3 grondverschuiving pixels en 2 niet-grondverschuiving pixels foutief geklasseerd. In totaal werden 133 van de 138 pixels (96%) correct geklasseerd, wat een zeer goed resultaat is.

Tenslotte werd gevoeligheidskaart in vier klassen opgedeeld. Er werd onderscheid gemaakt tussen zones met een lage, matige, hoge en zeer hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen (Tabel 3.2). Bij deze classificatie werd getracht om een belangrijk deel van de erosiezones binnen de gebieden met een zeer hoge en hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen onder te brengen. Terzelfder tijd werd echter wel getracht om de totale oppervlakte van de gebieden met een zeer hoge, hoge en matige gevoeligheid te beperken. De ondergrens van de zones met een hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen werd gelijkgesteld aan 0,00005, de cut-off waarde die bij de validatie tot goede resultaten leidde.

3.1.2 Toepassing van het opgestelde logistisch regressiemodel voor zeldzame gebeurtenissen op het 710 km² grote studiegebied van de Vlaamse Ardennen

In de vorige sectie werd beschreven hoe tijdens de verkennende studie rond grondverschuivingen in de Vlaamse Ardennen een logistisch regressie model werd opgesteld dat toeliet om een grondverschuivingsgevoeligheidskaart te maken. Aangezien de omgevingskenmerken van het 710 km² grote studiegebied grotendeels gelijkaardig zijn aan deze van het testgebied (zie opmerking in verband met kleine lithologische verschillen in paragraaf 2.2.1), zullen we in deze paragraaf toelichten hoe het gevonden model getest kan worden om een gevoeligheidskaart te maken van het grotere studiegebied.

3.1.2.A Aanmaak van basiskaarten en de gevoeligheidskaart

De basiskaarten voor deze analyse zijn rasterkaarten (10 m resolutie) van de hellingen en Tertiaire lithologie in het studiegebied. Voor de aanmaak van de hellingskaart werd gebruik gemaakt van LIDAR opnamen (Eng.: Light Detection and Ranging; OC GIS-Vlaanderen, 2005). Vertrekkende van een .txt-bestand met x, y en z coördinaten van punten in het studiegebied en een gemiddelde punt dichtheid van 1 punt per 20 m² (Fig. 3.1), werd een digitaal hoogtemodel (DHM) van het studiegebied gemaakt in IDRISI Andes. Van dit DHM werd vervolgens via standaard procedures een hellingenkaart afgeleid. Op deze kaart worden hellingen in percentages weergegeven. Meer informatie omtrent de gebruikte methode is te vinden in Van Den Eeckhaut et al. (2007a).

De rasterkaart van de Tertiaire geologie werd afgeleid van de digitale vectorkaart (OC GIS-Vlaanderen, 2001). Herklassering van deze kaart liet toe om drie kaarten te maken waarop enkel de ruimtelijke verdeling van respectievelijk de formatie van Tielt, het lid van Aalbeke en het lid van Moen zijn weergegeven. Meer specifiek hebben de rastercellen die binnen de betreffende lithologische formatie of lid liggen de waarde '1' terwijl de overige rastercellen een waarde '0' hebben.

Met deze basiskaarten kan een gevoeligheidskaart met betrekking tot massabewegingen opgesteld worden gebruikmakende van het model (vgl. 4, 5, 6) dat opgesteld werd voor het deelgebied.

3.1.2.B Validatie van de gevoeligheidskaart door confrontatie met een inventariskaart van grondverschuivingen afgeleid van LIDAR en terreinverificatie

De opgestelde gevoeligheidskaart zal vervolgens gevalideerd worden door te controleren of een zeer hoge tot hoge gevoeligheid toegekend wordt aan de in het uitbreidingsgebied gekarteerde grondverschuivingen. De gevoeligheidskaart zal hiervoor geconfronteerd worden met een inventariskaart van grondverschuivingen in het 510 km² grote uitbreidingsgebied. Deze inventariskaart is het resultaat van een op het terrein gecorrigeerde inventaris opgesteld door drie experts na analyse van gedetailleerde schaduw- en hoogtelijnenkaarten afgeleid van LIDAR. Grondverschuivingen die gerapporteerd werden door omwonenden of technische diensten of die beschreven werden in krantenartikels werden ook aan de inventaris toegevoegd.

De analyse van de van LIDAR afgeleide gedetailleerde topografische kaarten verliep in een GIS-omgeving. Net als voor de hellingskaart (Sectie 3.1.2.A; Fig. 3.1) werd vertrokken van een .txt-bestand met x, y en z coördinaten van punten in het studiegebied en een gemiddelde punt dichtheid van 1 punt per 20 m². In IDRISI Andes werd een digitaal hoogtemodel (DHM) met een 2 m resolutie van het studiegebied gemaakt en van dit DHM werden vervolgens via standaard procedures twee

schaduwkaarten (oriëntatie van lichtbron in noordwesten (Fig. 2.5) en noordoosten (Fig. 2.6)) en een hoogtelijnenkaart (2 m contour interval) gemaakt. Deze kaarten werden in IDRISI Andes door drie experts (i.e. geomorfologen die ruime ervaring hebben in het karteren van grondverschuivingen en dit zowel op het terrein als op basis van schaduw- en hoogtelijnenkaarten) geanalyseerd en vermoedelijke grondverschuivingen werden gedigitaliseerd. Na het samenvoegen van de resultaten van de drie experts bleek dat de overeenkomst tussen de experts groot was. Toch werd terreinverificatie uitgevoerd. Aangeduide sites waarvan de topografische kaart duidelijk aangaf dat het zeker geen grondverschuivingen waren (bijvoorbeeld zandgroeves, kleiputten of andere uitgravingen), werden echter niet bezocht. Grondverschuivingen werden op dezelfde wijze gekarteerd als in de verkennende studie, namelijk op basis van typische morfologische kenmerken (o.m. tegenhellingen, hoofdsteilrand, zompige zones, hobbelige topografie), materiële schade aan wegen en gebouwen (o.m. barsten, verzakkingen) en scheefgestelde bomen en palen.

3.2 Resultaten en discussie

3.2.1 Toepassing van het opgestelde logistisch regressiemodel voor zeldzame gebeurtenissen op het 710 km² grote studiegebied van de Vlaamse Ardennen

3.2.1.A De gevoeligheidskaart

De resulterende niet-geklasseerde en geklasseerde gevoeligheidskaarten voor grondverschuivingen zijn weergegeven in Fig. 3.2 en Fig. 3.3. Voor de classificatie werden dezelfde kanswaarden gebruikt als in de verkennende studie. In vergelijking met het 200 km² grote testgebied (Tabel 3.2), is in het 710 km² grote studiegebied de ruimtelijke verdeling van gebieden met een zeer hoge, hoge en matige gevoeligheid voor grondverschuivingen veel beperkter (Tabel 3.3).

3.2.1.B Validatie van de gevoeligheidskaart door confrontatie met een inventariskaart van grondverschuivingen afgeleid van LIDAR en terreinverificatie

Fig. 3.4 toont de inventariskaart van de grondverschuivingen die tijdens dit vervolgproject gekarteerd werden op basis van (1) LIDAR-afgeleide schaduw- en hoogtelijnenkaarten, (2) informatie van technische diensten van de betrokken gemeenten en omwonenden, en (3) terreinverificatie. Onmiddellijk hierop volgt in Fig. 3.5 de inventariskaart van het hele 710 km² grote studiegebied. Een overzicht van het aantal grondverschuivingen volgens gemeente en volgens type is terug te vinden in Tabel 3.4 en Fig. 3.6. In totaal werden in het 710 km² grote studiegebied 163 grote

grondverschuivingen met een diep schuifvlak en 47 complexe grondverschuivingen met een ondiep schuifvlak gekarteerd. In vergelijking met het 200 km² grote testgebied van de verkennende studie werden in het uitbreidingsgebied (510 km²) opmerkelijk minder grondverschuivingen waargenomen, zowel op de van LIDAR-afgeleide kaarten als op het terrein. Meer specifiek werden 45 grondverschuivingen met een diep en 14 complexe grondverschuivingen met een ondiep schuifvlak gekarteerd. Het testgebied bevatte blijkbaar de kern van het gebied waar grondverschuivingen een actief degradatieproces vormen. Fig. 3.7 toont dat in het testgebied meer steile hellingen voorkomen dan in het uitbreidingsgebied. Aangezien hellingsgradiënt de belangrijkste omgevingsfactor is die de gevoeligheid van een site voor grondverschuivingen bepaalt, is het lagere aantal grondverschuivingen in het uitbreidingsgebied vermoedelijk te wijten aan het beperktere voorkomen van steile hellingen.

Tabel 3.5 bevat informatie omtrent de belangrijkste morfologische kenmerken van de grondverschuivingen met een diep en ondiep schuifvlak. Een grote grondverschuiving met een diep (> 3 m) schuifvlak heeft een oppervlakte tussen 0,2 en 42,0 ha, met een gemiddelde van 4,2 ha en ligt op een hellingssectie met een gradiënt van 0,16 m.m⁻¹ wanneer gemeten van de top tot de teen van de grondverschuiving. Voor grondverschuivingen met een ondiep (< 3 m) schuifvlak werd een gemiddelde oppervlakte van 0,6 ha gemeten. Deze kleinere complexe verschuivingen hebben een gemiddelde hellingsgradiënt van 0,19 m.m⁻¹. Voor beide types grondverschuivingen zijn dit waarden die zeer gelijkaardig zijn als deze bekomen tijdens de verkennende studie (Van Den Eeckhaut et al., 2005).

Voor de validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart zullen enkel de grondverschuivingen met een diep glijvlak (n=45) gebruik worden. Omdat grondverschuiving 135r (i.e. Bosberg, Geraardsbergen) binnen grondverschuiving 135 werd gekarteerd, bevat de validatiedataset slechts 44 grondverschuivingen.

De 163 grondverschuivingen met een diep schuifvlak zijn op de geklasseerde gevoeligheidskaart (Fig. 3.3) weergegeven. Daar waar de ligging van de grondverschuivingen van het testgebied zeer goed overeenstemt met zones met een zeer hoge tot matige gevoeligheid lijkt dit niet zo te zijn voor de 44 nieuw gekarteerde grondverschuivingen met een diep schuifvlak in het uitbreidingsgebied. Deze vaststelling kan ook afgeleid worden uit de vergelijking van Tabel 3.2 en 3.3. Daar waar voor het testgebied bijna 97% van de pixels in de 116 erosiezones in een zone met zeer hoge tot matige gevoeligheid liggen, blijkt dit slechts het geval te zijn voor 68% van de pixels in de 44 erosiezones in het uitbreidingsgebied. Een gelijkaardige trend is er eveneens voor de hele grondverschuiving. De minder goed resultaten kunnen verband houden met de zeer lage ruimtelijke verdeling (i.e. 5,9%) van de zones met een zeer hoge tot matige gevoeligheid in het 710 km² grote studiegebied. Indien de klassengrenzen van de geklasseerde gevoeligheidskaart zouden aangepast worden zodat de procentuele ruimtelijke verdeling van de vier klassen in het testgebied (Tabel 3.2) en in het hele

studiegebied (Tabel 3.6) gelijk zijn, dan blijkt dat de resultaten sterk verbeteren. Er dient echter opgemerkt te worden dat door deze aanpassing van de klassengrenzen het ruimtelijk voorkomen van zones met een zeer hoge tot matige gevoeligheid voor grondverschuivingen sterk is toegenomen binnen het 200 km² studiegebied. Dit betekent dat op basis van het bestaande logistische regressiemodel (vgl. 6) enkel een bruikbare geklasseerde gevoeligheidskaart opgesteld kan worden na de bepaling van de meest optimale klassengrenzen.

Belangrijk is echter wel dat het oorspronkelijk model (vgl. 6) geen rekening houdt met kleine verschillen tussen de lithologie van het 200 km² grote testgebied en het 710 km² grote studiegebied. In paragraaf 2.2.1 werd reeds vermeld dat, in boringen uitgevoerd in het testgebied de klei van het lid van Merelbeke (Formatie van Gent) slechts zelden wordt teruggevonden (Jacobs et al., 1999a). De Formatie van Gent blijkt er voornamelijk uit zanden te bestaan. Daarom wordt op kaartblad 29 van de Tertiaire geologie voor de Formatie van Gent geen onderscheid gemaakt tussen dit kleirijke lid van Merelbeke en het meer zandige lid van Vlierzele (zie Fig. 2.1). In de overige kaartbladen die het volledige studiegebied omvatten (i.e. 21, 22, 30) werd deze indeling wel gemaakt. Aangezien de erosiezone van een deel van de 44 grondverschuivingen in het uitbreidingsgebied in het lid van Merelbeke ligt, is niet uit te sluiten dat op basis van alle grote grondverschuivingen met een diep schuifvlak (n=163) een nieuw en beter logistisch regressiemodel gecalibreerd en gevalideerd kan worden. In het volgend hoofdstuk zal dit onderzocht worden.

3.3 Conclusies

De combinatie van de analyse van LIDAR-afgeleide kaarten en terreincontrole resulteerde in respectievelijk 45 en 14 bijkomende grondverschuivingen met een diep en ondiep schuifvlak. Hun morfologische en topografische kenmerken zijn in overeenstemming met de resultaten bekomen tijdens de verkennende studie.

De goede overeenstemming tussen de ligging van de grondverschuivingen in het testgebied en de ligging van zones met een zeer hoge tot matige gevoeligheid is niet aanwezig voor de nieuw gekarteerde grondverschuivingen met een diep schuifvlak in het uitbreidingsgebied. Aangezien het oorspronkelijk model (vgl. 6) geen rekening houdt met kleine lithologische verschillen in het 200 km² grote testgebied en in het 710 km² grote studiegebied, is niet uit te sluiten dat op basis van alle 163 grote grondverschuivingen met een diep schuifvlak een nieuw en beter logistisch regressiemodel opgesteld kan worden.

Tabel 3.1: Aantal puntgegevens van grondverschuivingen (G) en niet-grondverschuivingen (niet-GV) gebruikt voor het opstellen van het logistisch regressiemodel voor het 200 km² grote testgebied tijdens de verkennende studie.

	Totaal	Calibratie	Validatie
GV	116	93	23
Niet-GV	580	465	115
	696	558	138

Tabel 3.2: Classificatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen (GV) in het 200 km² grote testgebied en validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart door confrontatie met de 116 grote GV met een diep (> 3 m) schuifvlak die tijdens de verkennende studie gekarteerd werden. Voor de 4 gevoeligheidsklassen wordt de verdeling voor het hele testgebied, voor de erosiezones en voor de ganse grondverschuivingen (erosie- en accumulatiezones) weergegeven.

Kanswaarde interval	Gevoeligheid voor GV	% Testgebied (200 km ²)		% Erosiezone		% Ganse grondverschuiving	
		Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*
0,0012–1	Zeer hoog	2,4	2,4	85,4	85,4	23,9	23,9
0,00005–0,0012	Hoog	5,4	7,8	9,3	94,7	29,5	53,4
0,00001–0,00005	Matig	6,9	14,7	2,0	96,7	20,6	74,0
0–0,00001	Laag	85,3	100,0	3,3	100,0	26,0	100,0

* Cumulatief

Tabel 3.3: Classificatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen (GV) in het 710 km² grote studiegebied en validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart door confrontatie met de 44 grote GV met een diep (> 3 m) schuifvlak die tijdens het vervolproject gekarteerd werden. Voor de 4 gevoeligheidsklassen wordt de verdeling voor het hele studiegebied, voor de erosiezones en voor de hele grondverschuivingen (erosie- en accumulatiezones) weergegeven. Voor de indeling van de gevoeligheidsklassen werd dezelfde indeling gebruikt als voor het testgebied (zie Tabel 3.2).

Kanswaarde interval	Gevoeligheid voor GV	% Studiegebied (710 km ²)		% Erosiezone		% Ganse grondverschuiving	
		Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*
0,0012–1	Zeer hoog	0,4	0,4	19,7	19,7	8,1	8,1
0,00005–0,0012	Hoog	2,1	2,5	32,0	51,7	27,7	35,8
0,00001–0,00005	Matig	3,4	5,9	16,4	68,1	25,6	61,4
0–0,00001	Laag	94,1	100,0	31,9	100,0	38,6	100,0

* Cumulatief

Tabel 3.4: Verdeling van de verschillende types grondverschuivingen over de 17 gemeenten die het vervolgproject omvatten (Rot_t1,2,3: rotatiele type 1, 2, 3; Complex_t1,2,3: Complexe verschuivingen type 1, 2, 3; Oever: verglijding langs de oevers van beken; voor meer informatie zie tabel 3.1 en 3.2 van de verkennende studie (Van Den Eeckhaut et al., 2005)).

	Diep (>3 m) / Groot (> 1 ha)								Ondiep (<3 m) / Klein (< 1 ha)		Hobbelig terrein*
	Totaal	Rot_t1	Rot_t2	Rot_t3	Complex_t1	Complex_t2	Complex_t3	Onduidelijk	Complex	Oever*	
Brakel	25	8	5	7	1	0	0	4	9	2	0
Gavere	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Geraardsbergen	9	1	1	6	0	0	0	1	0	0	3
Herzele	3	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
Horebeke	3	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Kluisbergen	26	7	5	6	1	3	2	2	6	0	0
Kruishoutem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lierde	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Maarkedal	26	6	10	4	0	0	1	5	8	5	3
Oosterzele	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oudenaarde	29	3	8	13	1	1	1	2	9	0	2
Ronse	28	14	4	7	0	1	0	2	7	0	4
St.-L.-Houtem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wort.-Petegem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zingem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zottegem	7	3	2	0	0	0	0	2	1	0	0
Zwalm	6	1	3	2	0	0	0	0	2	0	1
TOTAAL	163	45	40	45	3	6	4	20	47	8	15

* Onvolledig

Tabel 3.5: Morfologische en topografische kenmerken van grondverschuivingen met een diep en ondiep schuifvlak.

	Grote GV met diep (> 3 m) schuifvlak				Complexe GV met ondiep (<3 m) schuifvlak			
	Opp. (ha)	Lengte (m)	Breedte (m)	Helling* (m.m ⁻¹)	Opp. (ha)	Lengte (m)	Breedte (m)	Helling* (m.m ⁻¹)
Aantal	163	163	163	163	48	46	46	43
Gemiddelde	4,236	187	215	0,162	0,569	79	71	0,188
St. Deviatie	5,566	109	181	0,063	0,673	48	55	0,064
Minimum	0,108	20	30	0,022	0,024	10	8	0,107
Maximum	42,022	820	1450	0,667	2,791	200	250	0,375

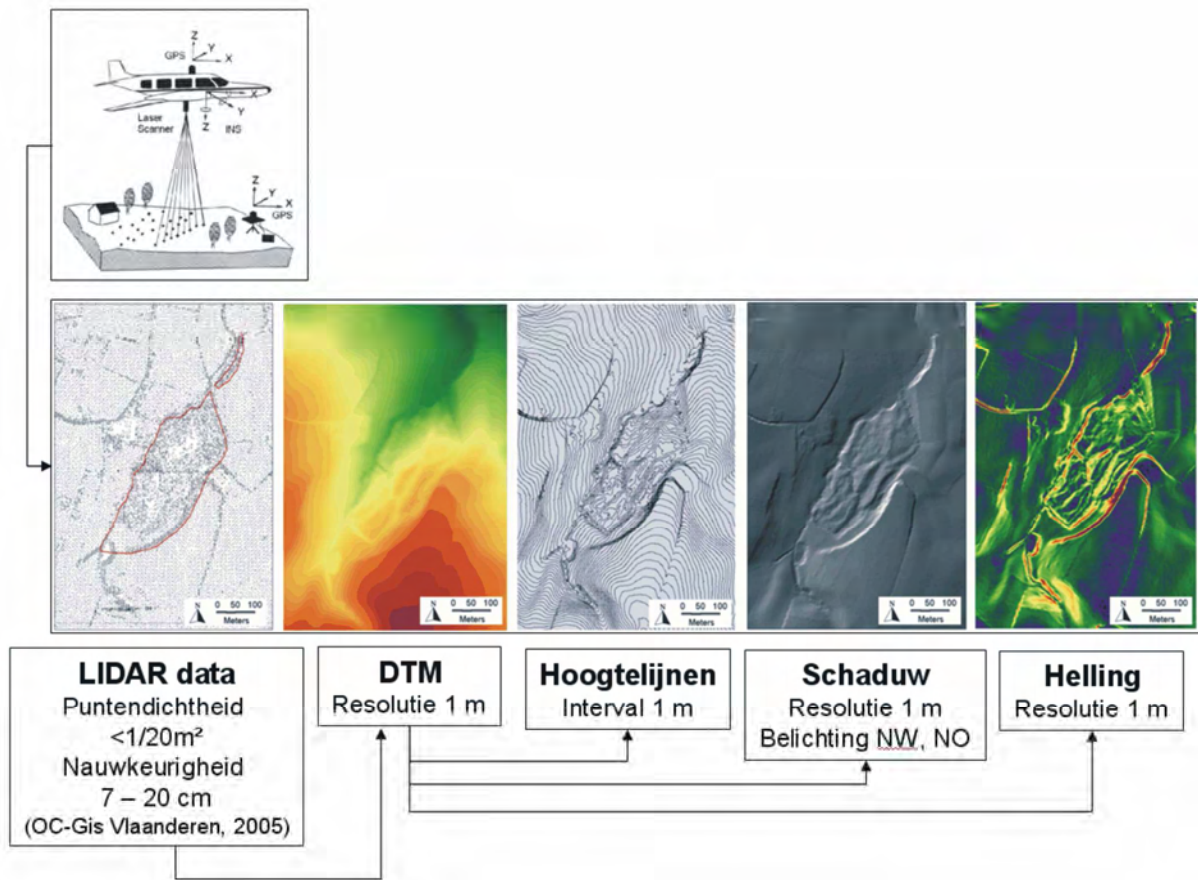
* Helling: gemiddelde helling gemeten van de top (centrale deel van de kruin) tot de teen (centrale deel van de voet) van de GV

Tabel 3.6: Classificatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen (GV) in het 710 km² grote studiegebied en validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart door confrontatie met de 44 grote GV met een diep (> 3 m) schuifvlak die tijdens het vervolgproject gekarteerd werden. Voor de 4 gevoeligheidsklassen wordt de verdeling voor het hele studiegebied, voor de erosiezones en voor de ganse grondverschuivingen (erosie- en accumulatiezones) weergegeven. Bij de indeling werd een zelfde procentuele verdeling binnen het 710 km² grote studiegebied als voor het 200 km² grote testgebied nagestreefd (zie Tabel 3.2).

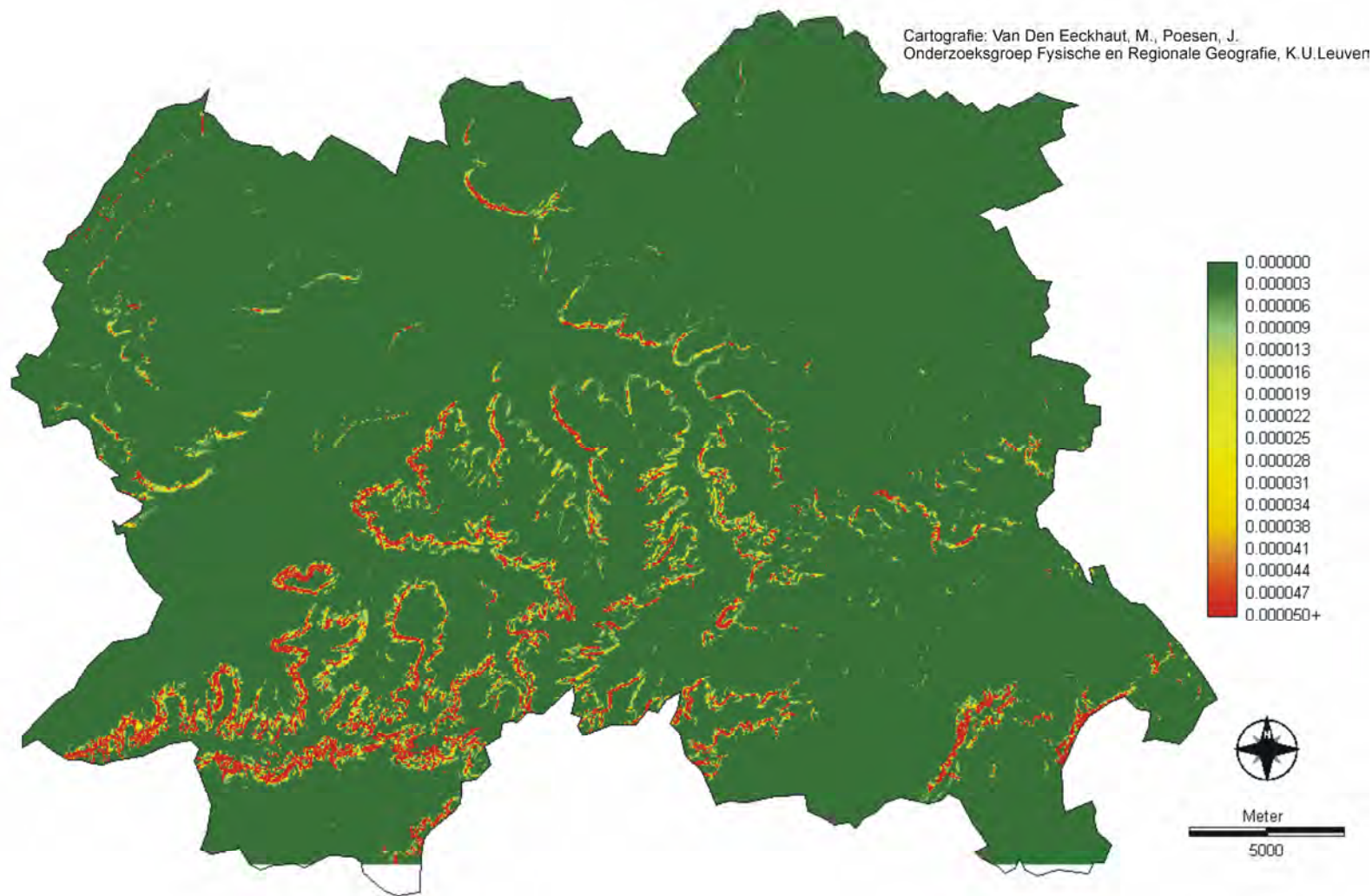
Kanswaarde interval	Gevoeligheid voor GV	% Studiegebied (710 km ²)		% Erosiezone		% Ganse grondverschuiving	
		Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*	Cum*
0,0000525-1	Zeer hoog	2,4	2,4	51,0	51,0	35,2	35,2
0,0000058-0,0000525	Hoog	5,4	7,8	21,7	72,7	34,4	69,6
0,0000017-0,0000058	Matig	6,9	14,7	11,8	84,5	15,0	84,6
0-0,0000017	Laag	85,3	100,0	15,5	100,0	15,4	100,0

* Cumulatief

Fig. 3.1: Interpolatie van een dicht netwerk van punten met zeer nauwkeurige x, y en z coördinaten afgeleid van laserscanning (Eng.: Light Detection and Ranging; LIDAR) resulteert in een gedetailleerd digitaal terreinmodel (DTM). Van dit DTM werden vervolgens hoogtelijnen-, schaduw- en hellingenkaarten afgeleid



Figuur 3.2: Ruimtelijke spreiding van de gevoeligheid voor grondverschuivingen in het studiegebied (710 km²) in de Vlaamse Ardennen. Kanswaarden, op basis van logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen, variëren van 0 (niet gevoelig voor grondverschuivingen) tot 1 (zeer gevoelig voor grondverschuivingen)



Figuur 3.3: Geklasseerde gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in het studiegebied (710 km²) in de Vlaamse Ardennen.

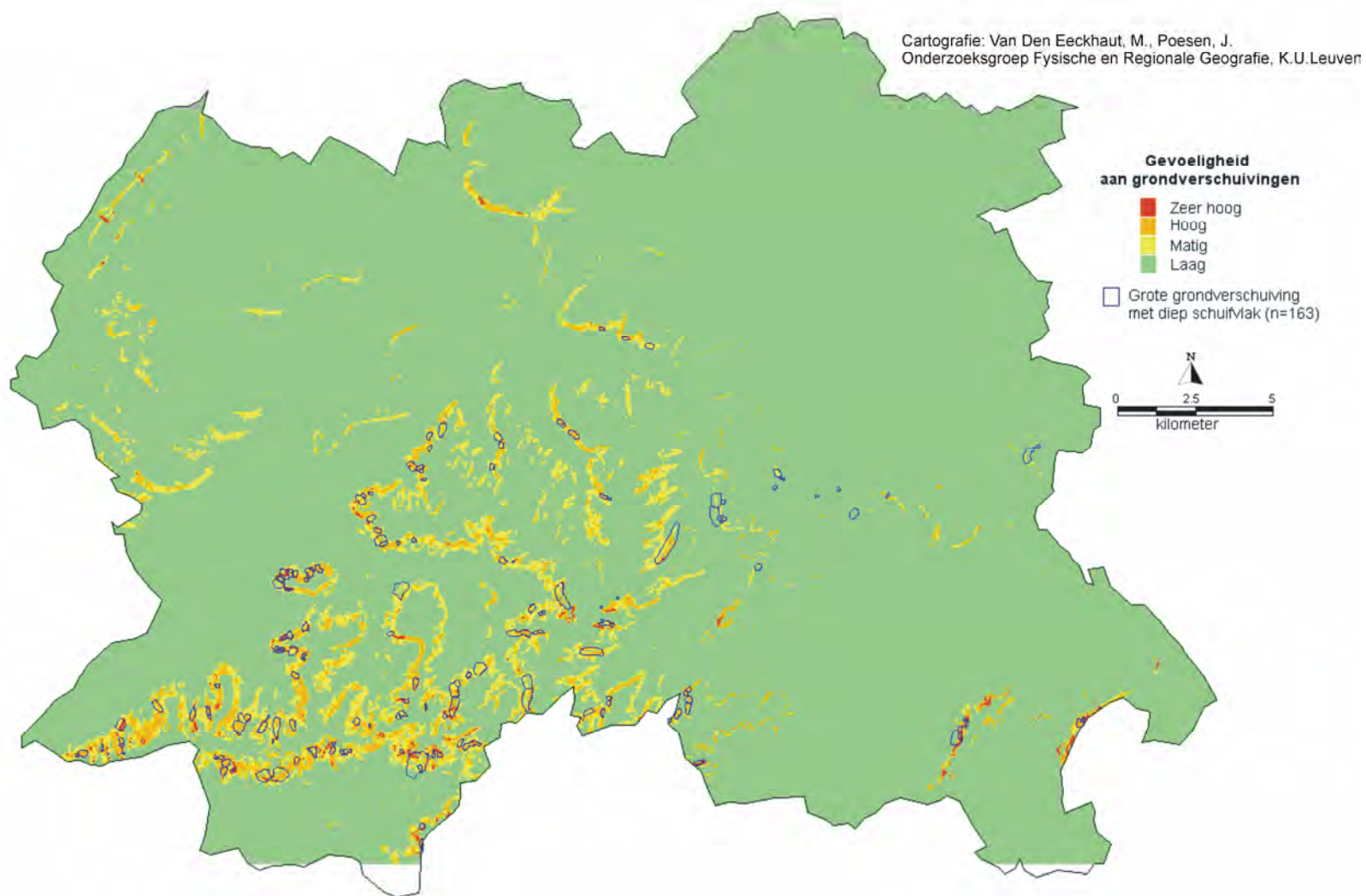


Fig. 3.4: Inventariskaart van grondverschuivingen (GV) die tijdens dit vervolgproject gekarteerd werden

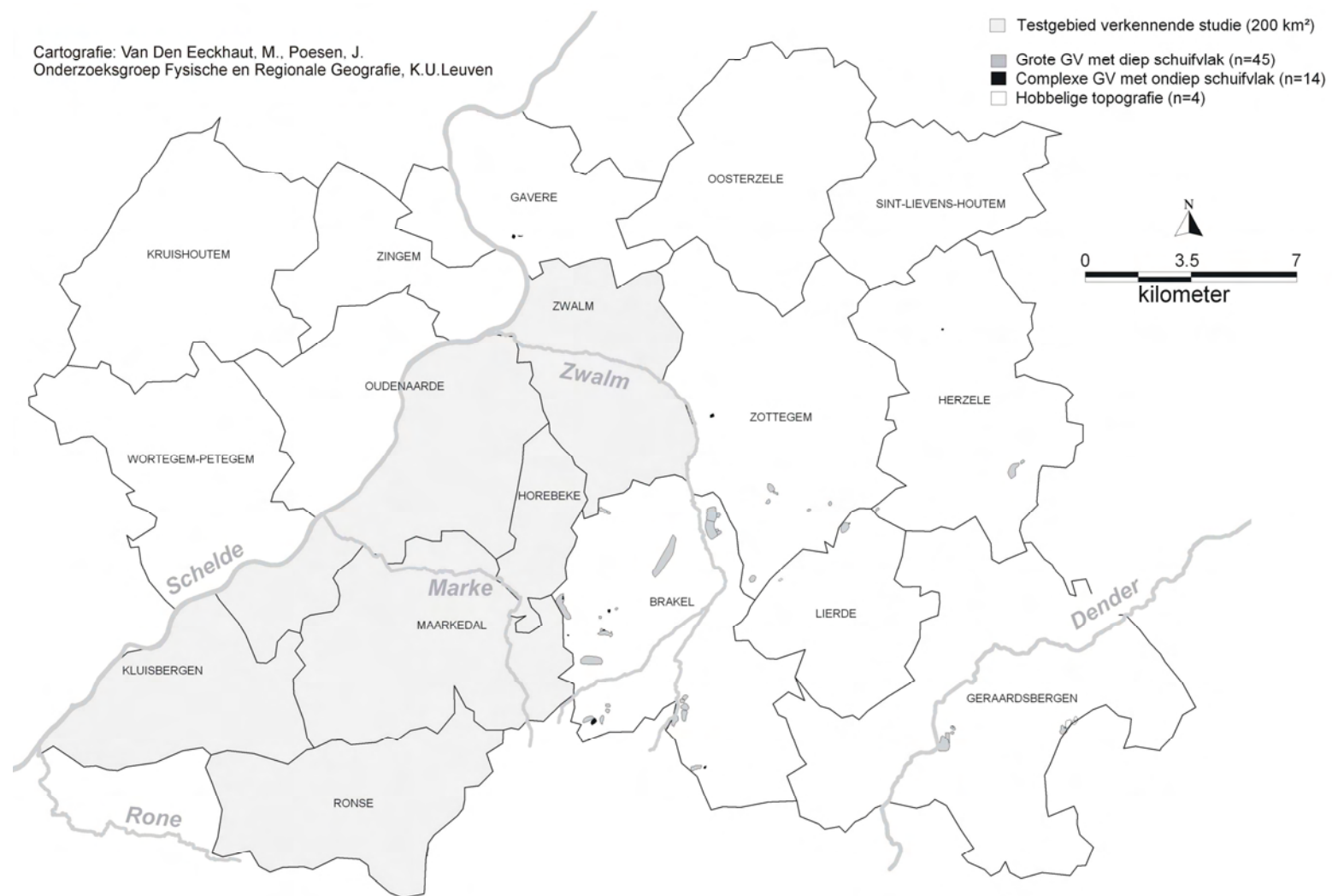


Fig. 3.5: Inventariskaart van grondverschuivingen (GV) in het 710 km² grote studiegebied



Fig. 3.6: Verdeling van grondverschuivingen in de 17 gemeenten die in deze vervolgstudie werden opgenomen

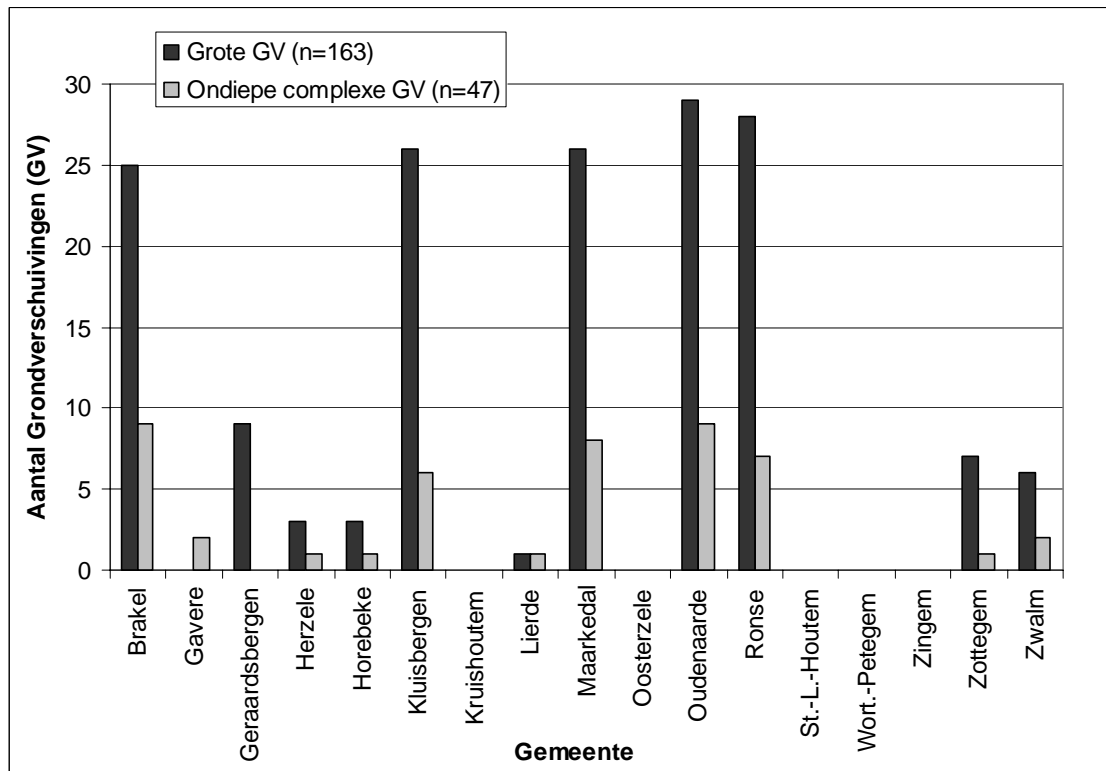
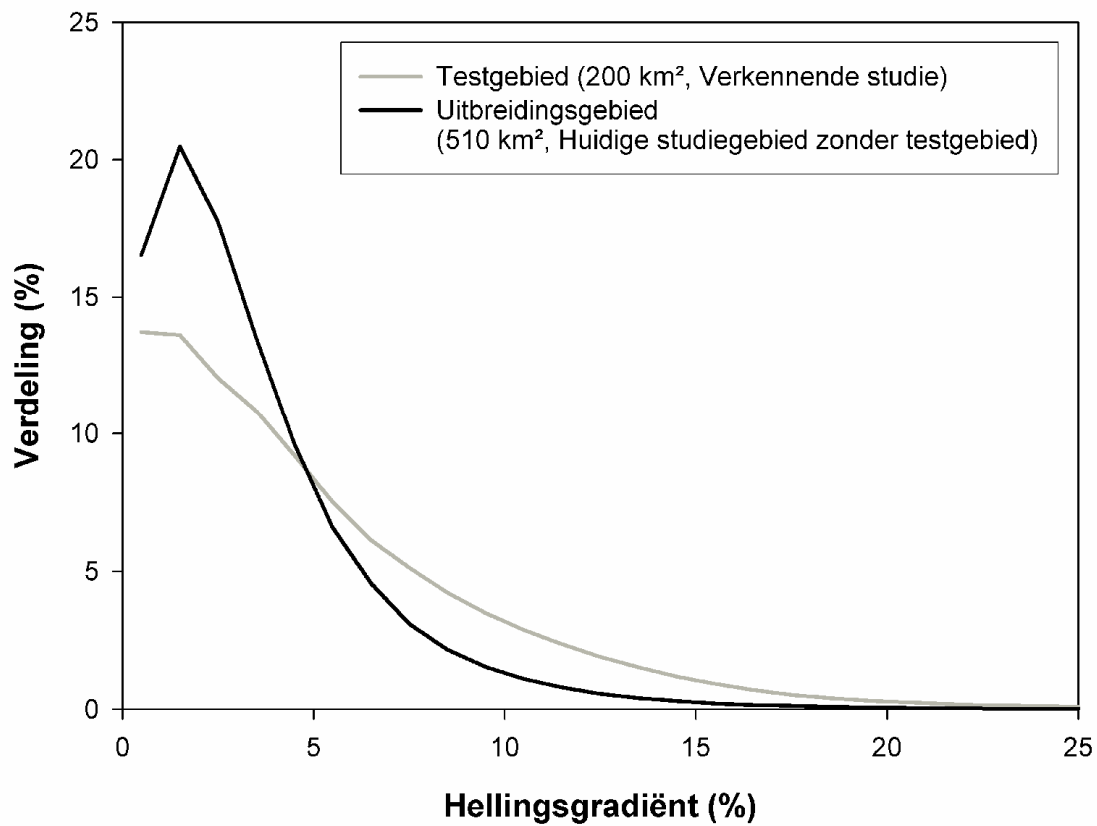


Fig. 3.7: Verdeling van de hellingen in het 200 km² grote testgebied (Verkennde studie, 2005) en in het 510 km² grote uitbreidingsgebied (i.e. dat deel van het 710 km² grote studiegebied dat niet tot het testgebied behoort). In het testgebied komen meer steilere hellingen voor dan in het uitbreidingsgebied



4. Opstellen van een nieuw model ter verbetering van de gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in de Vlaamse Ardennen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt voor het 710 km² grote studiegebied een nieuwe gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen opgesteld. Deze kaart zal vervolgens vergeleken worden met de gevoeligheidskaart (Fig. 3.3) die in hoofdstuk 3 werd gemaakt op basis van het testmodel (i.e. vgl. 6; opgesteld voor het 200 km² grote testgebied in de verkennende studie). Voor het nieuwe logistische regressiemodel (opnieuw gecorrigeerd voor zeldzame gebeurtenissen) zullen alle grote grondverschuivingen met een diep schuifvlak gebruikt worden.

Om de invloed van het kleirijke lid van Merelbeke op het voorkomen van grondverschuivingen na te gaan, zal voor de formatie van Gent onderscheid gemaakt worden tussen het kleirijke lid van Merelbeke en het zandige lid van Vlierzele. Aangezien op kaartblad 29 van de Tertiair geologische kaart (Fig. 2.1) geen onderscheid gemaakt wordt tussen deze twee leden, omdat de klei onvoldoende aangeboord werd (Jacobs et al., 1999a), zal op dit kaartblad de hele formatie van Gent als lid van Vlierzele beschouwd worden.

4.2 Materialen en methoden

4.2.1 Afhankelijke en onafhankelijke variabelen

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de afhankelijke en onafhankelijke variabelen die in de analyse worden opgenomen. Voor deze variabelen zit de informatie vervat in rasterkaarten met een resolutie van 10 m. De inventariskaart van de 163 grote grondverschuivingen bevat informatie omtrent de afhankelijke variabele. Net als in de verkennende studie wordt voor de analyse de centrale pixel van de erosiezone (zie Fig. 5.1 in Van Den Eeckhaut et al., 2005) gebruikt. De onafhankelijke variabelen omvatten topografische (i.e. hoogte boven zeeniveau, hellingsgradiënt, oriëntatie van de helling en kromming in plan), lithologische (i.e. Tertiaire lithologie), hydrologische (i.e. drainagetoestand van de bodem en afstand tot rivieren) en seismische (i.e. afstand tot breuken) variabelen.

Wat de variabele hellingsgradiënt betreft, zal dit keer de hellingsgradiënt van de geselecteerde centrale pixel gebruikt worden in plaats van de “pre-grondverschuivingshellingsgradiënt”. In de verkennende

studie werd getracht om na afbakening van de erosiezone de oorspronkelijke hellingsgradiënt (voorafgaand aan de grondverschuiving) te schatten (zie Fig. 5.1 in Van Den Eeckhaut et al., 2005). Omdat (1) deze schatting moeilijk en subjectief was, (2) de pre-grondverschuivingshellingsgradiënt voor de meeste grondverschuivingen slechts weinig verschilde van de huidige hellingsgradiënt en (3) voor de uiteindelijke gevoeligheidskaart toch met de van LIDAR-afgeleide hellingenkaart moet gewerkt worden, zal deze geschatte oorspronkelijke hellingsgradiënt echter niet meer gebruikt worden.

Net als in de verkennende studie werden categorische variabelen met n categorieën omgezet in $n-1$ dummy variabelen. Als referentiecategorieën werden achtereenvolgens oost voor de oriëntatie van de helling, plan-convexe hellingen voor kromming in plan, de formatie van Kortrijk-lid van Moen voor de Tertiaire lithologie en droge bodems voor bodemdrainage-toestand gekozen. Deze referentiecategorieën zijn geselecteerd op basis van (1) een relatief hoge ruimtelijke aanwezigheid in het studiegebied en (2) hun relevantie om de andere categorieën tegenover af te wegen.

4.2.2 Opstellen van een nieuwe gevoeligheidskaart met logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen

Voor een gedetailleerde toelichting van de logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen wordt verwezen naar paragraaf 3.3.1. Hierin worden onder andere de drie aanpassingen tegenover gewone logistische regressie toegelicht. De eerste aanpassing omvat het nemen van een toevallige steekproef *binnen* de twee categorieën van de afhankelijke variabele. Net als in de verkennende studie werden dit keer vijf keer meer niet-GV-pixels dan GV-pixels geselecteerd (Tabel 4.2). Naast de 162 bruikbare centrale pixels van erosiezones van grondverschuivingen werd daarom een “random stratified” selectie van 816 niet-GV-pixels genomen. Deze 816 pixels voldoen aan twee voorwaarden: (1) ze liggen allemaal op een afstand groter dan 50 m van een gekarteerde grondverschuiving, en (2) ze hebben een hellingsgradiënt steiler dan 6%. De eerste voorwaarde moet voorkomen dat omwille van een foute afbakening van de gekarteerde grondverschuivingen toch een pixel die gelegen is binnen een grondverschuiving als niet-GV-pixel zou geklasseerd worden. De tweede voorwaarde werd ingevoerd om binnen de zones met steilere hellingen een beter inzicht te krijgen in de variabelen die bijdragen tot de gevoeligheid voor grondverschuivingen. Bij een eerste “random stratified” selectie van niet-GV-pixels in het hele studiegebied werden namelijk te veel pixels met zeer lage hellingen, waarop nog nooit erosiezones van grote grondverschuivingen werden waargenomen in het studiegebied, geselecteerd. Hierdoor was het resulterende logistisch regressiemodel voornamelijk op hellingsgradiënt gebaseerd. Daarom werd vervolgens besloten om de zeer zwakke hellingen niet te gebruiken tijdens de modelopbouw. Een hellingsgradiënt van 6% werd als ondergrens gekozen, omdat 96% van alle pixels gelegen binnen een grondverschuiving een steilere hellingsgradiënt hebben,

terwijl slechts 20% van de hellingen in het studiegebied steiler zijn. De invoering van deze tweede voorwaarde kan dus bijdragen tot een verbetering van het logistisch regressiemodel. Tenslotte werd de dataset (Tabel 4.2) opgedeeld in een calibratie- en validatiedataset die respectievelijk 75% en 25% van het studiegebied omvatten.

Omwille van de verschillende verhouding van geselecteerde GV- en niet-GV-pixels werd het intercept (α) in tweede instantie aangepast met vgl. 3. Voor het nieuwe model blijft:

$$\bar{y} = 1/5$$

met \bar{y} de verhouding van het aantal GV-pixels tot het aantal niet-GV-pixels in de steekproef, en wordt:

$$\tau = 68510/7012125$$

met τ de verhouding van het totaal aantal pixels gelegen in een grondverschuiving tot het totaal aantal niet-grondverschuiving pixels in het studiegebied. Waar in de verkennende studie τ nog gedefinieerd werd als de verhouding van het aantal centrale pixels van erosiezones van grondverschuivingen tot het totaal aantal pixels in het studiegebied, is ondertussen uit ervaring gebleken dat het beter is om τ te definiëren als de verhouding van het totaal aantal pixels gelegen binnen een grondverschuiving tot het totaal aantal pixels in het studiegebied.

De derde aanpassing met behulp van vgl. 4 en 5 werd uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 3.1.1.

Verschiedende parameters werden gebruikt voor de evaluatie en validatie van het gecalibreerde model. Het Akaike's Informatie Criterium (AIC; $-2\log(\text{likelihood})+2n$ met n het aantal onafhankelijke variabelen in het model) zegt iets over de kwaliteit van het gecalibreerde model. Hoe lager de waarde, hoe beter het model. Wanneer de logistische regressie analyse verschillende modellen oplevert, laat deze parameter toe om het best gecalibreerde model te selecteren.

In een 'confusion matrix' (Tabel 4.3) wordt het aantal correct positief (true positive; TP), foutief negatief (false negative; FN), foutief positief (false positive; FP), en correct negatief (true negative; TN) gemodelleerde pixels schematisch weergegeven voor een bepaalde kritische kanswaarde (pixels met een kanswaarde groter dan deze waarde worden als een GV-pixel beschouwd, terwijl pixels met een kanswaarde kleiner dan deze waarde als een niet-GV-pixel zullen worden beschouwd; Eng.: cut-off value). Door 'confusion matrices' op te stellen voor verschillende kritische kanswaarden en deze onderling te vergelijken, kan de kanswaarde gevonden worden die het beste onderscheid maakt tussen

pixels waar een grondverschuiving verwacht wordt en pixels waar geen grondverschuiving verwacht wordt. Merk op dat bij de evaluatie foutief negatief gemodelleerde pixels eigenlijk zwaarder zouden moeten doorwegen dan foutief positief gemodelleerde pixels. In het eerste geval is er immers reeds een grondverschuiving, maar kon deze niet door het model herkend worden. In het tweede geval kan de hoge gevoeligheid erop wijzen dat de initiatie van een grondverschuiving in de toekomst niet uitgesloten mag worden.

De informatie uit verschillende ‘confusion matrices’ laat eveneens toe om een ‘ROC curve’ (Eng.: Receiver Operating Characteristic curve) op stellen (Lasko et al., 2005). In een dergelijke grafiek worden ‘1-specificiteit’ en ‘sensitiviteit’ weergegevens op respectievelijk de X- en Y-as.

De sensitiviteit (Eng.: sensitivity) wordt berekend als:

$$\frac{TP}{TP + TN} \quad (7)$$

en is dus de verhouding van het aantal door het model correct geklasseerde GV-pixels tot het totaal aantal GV-pixels.

en de specificiteit (Eng.: specificity) als:

$$\frac{TN}{TN + FP} \quad (8)$$

en is dus de verhouding van het aantal door het model correct geklasseerde niet-GV-pixels tot het totaal aantal niet-GV-pixels.

Tenslotte werd ook de ‘PABAK-waarde’ (Eng.: Prevalance and Bias Adjusted Kappa) berekend uit de informatie van de confusion matrices. Deze parameter bepaalt de overeenkomst tussen de realiteit en de modelresultaten en houdt hierbij rekening met het verschil in verhouding van het aantal GV-pixels en niet-GV-pixels. Hoe dichter de waarde aanleunt aan 1, hoe groter de overeenkomst tussen de realiteit en het model. PABAK wordt gedefinieerd als (Byrt et al., 1993):

$$\frac{2x(TP + TN)}{N} - 1 \quad (10)$$

met N het totaal aantal GV- en niet-GV-pixels (i.e. TP+TN+FP+FN).

4.2.3 Validatie van de nieuwe gevoeligheidskaart door confrontatie met terreingegevens

Om de nieuwe gevoeligheidskaart nog eens extra te valideren werden buiten het 200 km² grote testgebied van de verkennende studie (2005) minstens 60 sites met verschillende gevoeligheid voor massabewegingen op het terrein bezocht en werd de aanwezigheid van sporen van grondverschuivingen onderzocht. Naast de controle van de aan bestaande grondverschuivingen (Fig. 3.4) toegekende gevoeligheid wordt hier dus ook onderzocht aan welke bijkomende zones de gevoeligheidskaart een zeer hoge tot matige gevoeligheid toekent. Sites konden omwille van vier redenen geselecteerd worden, namelijk omdat:

1. één of meer experts mogelijke indicaties voor de aanwezigheid van een grondverschuiving had aangetroffen op de van LIDAR-afgeleide kaarten;

en/of

2. de gevoeligheidskaart een hoge en zeer hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen aangaf;

en/of

3. de site ons gerapporteerd was als grondverschuiving door omwonenden of technische diensten of omdat krantenartikels of andere documenten de grondverschuiving beschreven;

of

4. op de site sporen van hobbelig terrein of slechte drainage werden waargenomen tijdens de terreinverificatie van een grondverschuiving in de buurt. Deze sites waren niet vooraf geselecteerd. Ze werden eerder toevallig bestudeerd tijdens de controle van een nabijgelegen site die aan één van de drie bovenstaande criteria voldeed. Doordat deze toevallige sites sporen vertoonden van hobbelig terrein of slechte drainage, werd hun gevoeligheid ook gecontroleerd.

De bezochte sites konden achteraf in twee groepen worden onderverdeeld: 'grondverschuivingen' en 'niet-grondverschuivingen'. Van elke bezochte site werd een steekkaart gemaakt.

4.3 Resultaten

4.3.1 De nieuwe gevoeligheidskaart opgesteld met logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen

De verschillende onafhankelijke variabelen (Tabel 4.1) bleken niet multicollineair te zijn en konden dus allemaal samen als parameters ingevoerd worden bij de modelopbouw. Logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen resulteerde in volgend model:

$$\begin{aligned} \log(\hat{p}/1 - \hat{p}) & -13,418 \\ & + (0,386 \times \text{helling}) \\ & + (2,520 \times \text{NW}) + (2,948 \times \text{W}) + (2,043 \times \text{ZW}) + (2,399 \times \text{Z}) + (1,653 \times \text{ZO}) \\ & + (2,337 \times \text{GeVI}) + (2,407 \times \text{GeMe}) + (1,488 \times \text{Tt}) + (1,381 \times \text{KoAa}) \end{aligned} \quad (11)$$

Dit model zal vanaf nu het ‘*nieuwe model*’ genoemd worden.

Substitutie van vgl. 11 in vgl. 2 liet vervolgens toe om de ongecorrigeerde kans op het voorkomen van een grondverschuiving (\tilde{p}_i) te bereken. Met vgl. 5 en kennis van variantie-covariantiematrix $V(\beta)$:

	Intercept	Helling	ZO	Z	ZW	W	NW	GeVI	GeMe	Tt	KoAa
Intercept	1,1128	-0,0324	-0,4696	-0,4163	-0,3555	-0,4596	-0,4279	-0,2988	-0,3524	-0,2413	-0,1842
Helling	-0,0324	0,0014	0,0100	0,0069	0,0045	0,0089	0,0081	0,0067	0,0081	0,0036	0,0006
ZO	-0,4696	0,0100	0,7077	0,2925	0,2762	0,3023	0,2959	0,0230	0,0743	0,0363	0,0026
Z	-0,4163	0,0069	0,2925	0,4607	0,2688	0,2865	0,2807	0,0128	0,0687	0,0408	0,0364
ZW	-0,3555	0,0045	0,2762	0,2688	0,4624	0,2698	0,2657	0,0011	0,0380	0,0315	0,0162
W	-0,4596	0,0089	0,3023	0,2865	0,2698	0,4243	0,2933	0,0600	0,0796	0,0354	0,0333
NW	-0,4279	0,0081	0,2959	0,2807	0,2657	0,2933	0,3954	0,0430	0,0597	0,0159	0,0190
GeVI	-0,2988	0,0067	0,0230	0,0128	0,0011	0,0600	0,0430	0,4650	0,1880	0,1634	0,1537
GeMe	-0,3524	0,0081	0,0743	0,0687	0,0380	0,0796	0,0597	0,1880	0,7084	0,1716	0,1564
Tt	-0,2413	0,0036	0,0363	0,0408	0,0315	0,0354	0,0159	0,1634	0,1716	0,2285	0,1532
KoAa	-0,1842	0,0006	0,0026	0,0364	0,0162	0,0333	0,0190	0,1537	0,1564	0,1532	0,2904

kon voor iedere pixel de correctiefactor C_i berekend worden. Zodat uiteindelijk de gecorrigeerde kans op het voorkomen van een grondverschuiving ($\text{Pr}(Y_i=1)$) berekend werd met vgl. 4.

Tabel 4.4 geeft meer informatie omtrent het gecalibreerde nieuwe model. In de laatste kolom staat de AIC-waarde. De opeenvolgende opname van de tien significante onafhankelijke variabelen in het model zorgt voor een systematische afname van deze waarde. De plotse sprong bij de opname van

helling wijst erop dat hellingsgradiënt een zeer belangrijke factor is. Door tien univariate logistische regressiemodellen te kalibreren waarbij telkens één van de significante onafhankelijke variabelen is opgenomen, werden 10 AIC-waarden bekomen die het belang van elk van de variabelen aan de kwaliteit van het multivariate model aanduidt (Tabel 4.5). Hieruit volgt dat helling inderdaad de belangrijkste omgevingsfactor is die de ligging van sites gevoelig voor grondverschuivingen bepaald. Het verschil tussen de 9 overige factoren is daarentegen beperkt. De kansverhoudingsratio (Tabel 4.4) van de hellingsgradiënt is 1,47. Dit betekent dat voor iedere stijging van de helling met één percent, de kans op het voorkomen van een grondverschuiving met 47% toeneemt. Voor categorische variabelen geeft de kansverhoudingsratio de verandering in de kansverhouding in vergelijking met de referentiecategorie. In vergelijking met naar het oosten gerichte hellingen, worden er dus respectievelijk 19, 12, 11, 8 en 5 keer meer grondverschuivingen verwacht op west, noordwest, zuid, zuidwest en zuidoost gerichte hellingen. Op een zelfde manier worden er respectievelijk 11, 10, 4 en 4 keer meer grondverschuivingen verwacht in het lid van Merelbeke, het lid van Vlierzele, de formatie van Tielt en het lid van Aalbeke.

Fig. 4.1 is een grafische weergave van de sensitiviteit, de specificiteit, de correct geklasseerde pixels en de PABAK-waarde voor verschillende kritische kanswaarden. Zowel voor de calibratie- als de validatiedataset levert een kanswaarde $p=0,02$ het beste resultaat op. Wat de calibratiedataset betreft worden voor deze kanswaarde 86% van alle GV-pixels, 96% van alle niet-GV-pixels en 94,5% van alle 732 pixels correct geklasseerd. Verder wijst een PABAK-waarde van 0,90 op een bijna perfecte overeenkomst tussen het nieuwe model en de realiteit. De resultaten van de validatiedataset zijn zelfs nog iets beter. Fig. 4.2 toont de ROC-curve voor deze kritische kanswaarde $p=0,02$. Hoe meer de relatie tussen '1-specificiteit' en 'sensitiviteit' evolueert van (0,0) over (0,1) naar (1,1), hoe beter het model. De ROC-curves tonen bijgevolg dat het nieuwe model van een zeer hoge kwaliteit is. Bovendien toont een vergelijking met de ROC-curves opgesteld voor de calibratie- en validatiedataset van het model voor het 200 km² testgebied dat het nieuwe model opgesteld voor het 710 km² zeker niet aan kwaliteit heeft ingeboet.

Aangezien de evaluatie van het nieuwe model aantoont dat het opgestelde logistisch regressiemodel (vgl. 11) een hoge kwaliteit heeft, kan het model gebruikt worden voor het opstellen van een gevoeligheidskaart. De ongeklasseerde gevoeligheidskaart is weergegeven in Fig. 4.3. Deze kaart werd vervolgens geklasseerd in vier klassen (Fig. 4.4, Tabel 4.6). De ondergrens van de zone met een zeer hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen werd vastgelegd bij een kanswaarde van 0,02. Zoals eerder gemeld was bij deze kanswaarde de scheiding tussen de GV- en niet-GV-pixels het beste en dit

zowel voor de calibratie- als validatiedataset (Fig. 4.1). Tabel 4.6 geeft aan dat hoewel deze zone met een zeer hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen slechts 1,5% van het studiegebied omvat, respectievelijk 74% en 30% van de pixels in de 162 erosiezones en hele grondverschuivingen binnen deze zone liggen.

De ondergrens van de zone met hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen ligt bij een kanswaarde van 0,004. In totaal behoort ongeveer 4,5% van het studiegebied tot een zone met een zeer hoge of hoge gevoeligheid. Hierin liggen 90% van de pixels in de 162 erosiezones en bijna 60% van de pixels in de ganse grondverschuivingen (Tabel 4.6). De keuze van de ondergrens ligt bij 0,004 omdat een bedekking van 4,5% van het studiegebied overeenkomt met de maximale schatting van de bedekkingsgraad van zichtbare en niet meer zichtbare (hoofsteilrand en tegenhellingen zijn niet meer te herkennen als gevolg van menselijke activiteiten of ouderdom van de grondverschuiving) grondverschuivingen in het studiegebied. Deze schatting is het resultaat van een studie van Van Den Eeckhaut et al. (2007b) waarbij de frequentieverdeling van de oppervlaktes van alle geïnventariseerde grondverschuivingen in de Vlaamse Ardennen vergeleken werd met een universele frequentieverdeling (Malamud et al., 2004) afgeleid van verschillende inventarissen voor grondverschuivingen in bergachtige gebieden in de wereld.

De gevoeligheidskaart (Fig. 4.4) is niet opgesteld voor de schatting van de gevoeligheid voor kleine grondverschuivingen met een ondiep schuifvlak. Omdat een visuele vergelijking van de inventariskaart van ondiepe grondverschuivingen en de geklasseerde gevoeligheidskaart deed vermoeden dat de gevoeligheidskaart in staat was om een niet te verwaarlozen deel van de ondiepe grondverschuivingen te voorspellen, toont tabel 4.7 het resultaat van de confrontatie van beide kaarten. Hieruit blijkt dat toch ruim 82% van de pixels binnen een ondiepe grondverschuiving in een zone met een zeer hoge tot matige gevoeligheid voor grondverschuivingen ligt.

4.3.2 Validatie van de nieuwe gevoeligheidskaart door confrontatie met terreingegevens

In het 510 km² grote uitbreidingsgebied werden uiteindelijk 75 sites met uiteenlopende gevoeligheid bezocht. In totaal werden 54 steekkaarten van sites met een grondverschuiving opgesteld. Voor deze sites werd dezelfde steekkaartopbouw gebruikt als in de verkennende studie (zie bijlage 1). In enkele gevallen werd een afzonderlijke steekkaart gemaakt van een recentere reactivatie binnen een grotere, oude grondverschuiving met een diep schuifvlak. De bezochte grondverschuivingen met een diep

schuifvlak werden samen met de tijdens de verkennende studie gekarteerde grondverschuivingen met succes gebruikt voor de calibratie en validatie van het nieuwe model.

Verder werden 21 sites bezocht waar op het terrein geen (duidelijke) sporen van een grondverschuiving aangetroffen worden (Fig. 4.6). Er werd getracht om de steekkaarten van deze sites (zie bijlage 2) zoveel mogelijk af te stemmen op deze van de grondverschuivingen. Verschillend is dat voor deze sites vaak het selectie criterium (zie paragraaf 3.1.2.C) vermeld wordt in de sectie 'Opmerkingen' en dat een uitsnede van de gecorrigeerde gevoeligheidskaart wordt weergegeven.

De verdelingen van de pixels binnen grondverschuivingen met een diep schuifvlak (> 3 m; $n=45$), grondverschuivingen met een ondiep schuifvlak (< 3 m, $n=15$) en bezochte sites zonder duidelijke sporen van een grondverschuiving ($n=21$) zijn weergegeven in respectievelijk tabellen 4.8, 4.9 en 4.10. De resultaten af te leiden uit tabellen 4.8 en 4.9 zijn gelijkaardig aan de resultaten besproken bij de calibratie en validatie van het nieuwe model in sectie 4.3 en bevestigen de hoge kwaliteit van het model. Meer specifiek tonen beide tabellen dat gemiddeld bijna 80% van de pixels binnen een grondverschuiving met een diep of ondiep schuifvlak een zeer hoge of hoge gevoeligheid hebben. Voor enkele grondverschuivingen (vb. 72a, 73c en 140b) zijn de voorspellingen minder goed. Dit kan verklaard worden doordat het hier zeer grote grondverschuivingen betreft waarvoor aan de accumulatiezone een lage en matige gevoeligheid werd toegekend.

Wat de sites zonder duidelijke sporen van grondverschuivingen betreft (Tabel 4.10), wordt gemiddeld aan slechts 41% van de pixels een zeer hoge of hoge gevoeligheid toegekend. Voor een deel van de sites (vb. S8, S17 en S19) loopt dit percentage echter op tot meer dan 80%. Dit illustreert dat niet op alle sites met zeer hoge en hoge gevoeligheid zichtbare sporen van grondverschuivingen aanwezig zijn. In een klein aantal gevallen was de hogere gevoeligheid in vergelijking met de onmiddellijke omgeving voornamelijk te wijten aan menselijke ingrepen in het landschap. Een duidelijk voorbeeld is site S1 (Oorloge, Brakel) waar langsheen de steilere flanken van een spoorwegtraject een hoge gevoeligheid was toegekend.

4.4 Aanbevelingen voor het gebruik van de geklasseerde gevoeligheidskaart

Het nieuw logistisch regressiemodel (vgl. 11) is eigenlijk opgesteld voor de voorspelling van bestaande en toekomstige initiatiezones van grondverschuivingen. Bij de evaluatie van het model is gebleken dat deze erosiezones bijna volledig in zones met een zeer hoge tot hoge gevoeligheid liggen (Tabel 4.6; Fig. 4.7, 4.8). Rekening houdend met bovenstaande opmerking is het vrij logisch dat de evaluatie van de gevoeligheidskaart aan de hand van alle pixels gelegen binnen een gekarteerde

grondverschuiving (dus inclusief pixels uit accumulatiezones) minder goede resultaten opleverde in vergelijking met een evaluatie op basis van enkel de erosiezones. Toch blijkt echter dat nog steeds 84% van alle pixels binnen een grondverschuiving in een zone met een zeer hoge tot matige gevoeligheid liggen, wat een zeer goed resultaat is.

Bij het raadplegen van de gevoeligheidskaart wordt voorgesteld om eerst te controleren wat de gevoeligheid van de site is. Indien de site in een zone met een *zeer hoge tot matige gevoeligheid* ligt, dient ze zeker *verder onderzocht* te worden (bijvoorbeeld Fig. 4.9).


Sites met een *matige* gevoeligheid vormen in feite de *moelijkste groep* qua interpretatie, aangezien de twijfelachtige zones vooral in deze categorie voorkomen. Twee uiterste gevallen zijn nog relatief eenvoudig te evalueren. Enerzijds toont de geklasseerde gevoeligheidskaart veel zones met een matige gevoeligheid (onmiddellijk) hellingafwaarts van hellingsecties met een zeer hoge tot hoge gevoeligheid (Fig. 4.7; 4.8). Anderzijds toont de kaart relatief kleine geïsoleerde sites met een matige gevoeligheid temidden van sites met een lage gevoeligheid (Fig. 4.10). Deze laatste groep omvat vermoedelijk vooral relatief stabiele sites waar de gevoeligheid zeer lokaal iets hoger is omwille van een lokale helling die iets steiler is in vergelijking met de omgeving. De eerste groep van zones met een matige gevoeligheid omvat echter vooral sites die in de accumulatiezone van bestaande of toekomstige grondverschuivingen liggen. De zones met een hogere gevoeligheid hellingopwaarts zijn immers bestaande of toekomstige erosiezones. Hellingsecties die tot deze groep behoren, dienen dan ook zeer voorzichtig beheerd te worden. Tussen deze twee bovenstaande uiterste gevallen met een matige gevoeligheid zitten relatief grote aaneengesloten zones met een matige gevoeligheid zonder zones met zeer hoge of hoge gevoeligheid in de onmiddellijke omgeving. Hoewel de kans op het voorkomen van een grondverschuiving hier kleiner is dan in het hierboven beschreven eerste geval, is ook hier is een zekere voorzichtigheid geboden indien er interventies in deze gebieden gepland worden.

Dit brengt ons bij een belangrijk aspect op het gebied van de stabiliteit van hellingen, namelijk *menselijke ingrepen*. Bij het opstellen van de gevoeligheidskaart werd geen rekening gehouden met mogelijke menselijke interventies op de hellingsecties. Voldoende gevalstudies (o.a. Van Den Eeckhaut et al., 2007c) hebben echter aangetoond dat menselijke ingrepen, zoals het afgraven van hellingmateriaal in de accumulatiezone (wegnemen van laterale steun en dus toename van schuifspanning), het ophogen van het terrein (toevoegen van extra gewicht in de erosiezone leidt tot een toename van schuifspanning) en een onoordeelkundige waterhuishouding op de helling (aanleggen

van vijvers, slecht onderhoud van grachten en afwatering van hoger gelegen percelen naar de grondverschuiving leiden tot een afname van de schuifweerstand), op en in de onmiddellijke omgeving van inherent instabiele hellingen de stabiliteit van een helling verlagen en de initiatie of reactivatie van een grondverschuiving bevorderen. Er werd reeds vastgesteld dat reactivaties onder invloed van menselijke ingrepen vaak plaatsvinden in de accumulatiezones van bestaande grondverschuivingen met een diep schuifvlak, en dus in zones waarvoor het model voornamelijk een matige gevoeligheid toekent.

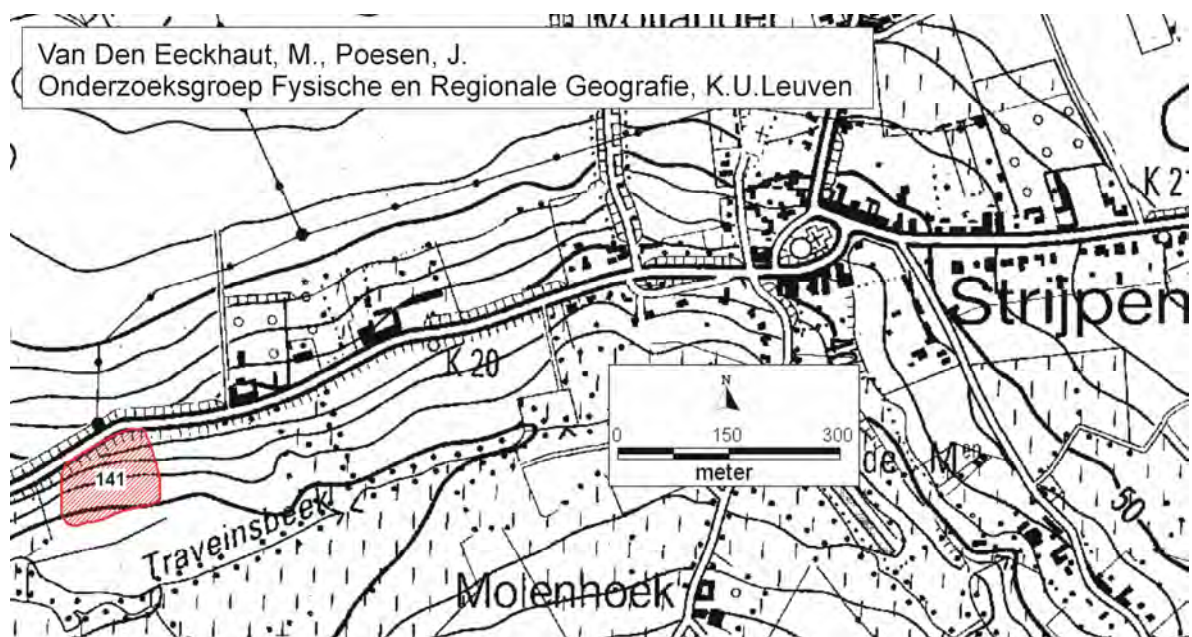
Het is dan ook aan te raden om dergelijke *menselijke interventies niet enkel te vermijden op hellingssecties met een zeer hoge en hoge gevoeligheid, maar ook op sites met een matige gevoeligheid gelegen in de onmiddellijke omgeving, en vooral hellingafwaarts, van zones met een zeer hoge of hoge gevoeligheid.*

Het belang van bovenstaand advies werd duidelijk tijdens dit project. Aan de hand van twee recent geïnitieerde grondverschuivingen (i.e. GV 141 Strijpen te Zottegem en GV. 145 Sint-Rochus te Herzele) waarvan de steekkaarten hieronder zijn weergegeven, wordt geïllustreerd wat de impact van ingrijpende menselijke interventies is op ogenschijnlijk stabiele sites. GV. 141 werd hellingafwaarts van uitgevoerde wegwerkzaamheden geïnitieerd. Ze werd ons gemeld door Ir. Haelterman (Vlaamse Overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Afdeling Geotechniek). GV. 145 is een grondverschuiving op een bouwperceel, die ons zowel door de eigenaar van het perceel als door de gemeente Herzele gemeld werd. In beide gevallen werd tijdens het terreinbezoek vastgesteld dat de gemiddelde hellingsgradiënt van de site eerder beperkt was (i.e. 8 à 10%), zodat op basis van een terreinbezoek en zonder de raadpleging van de gevoeligheidskaart een positief advies voor het uitvoeren van de wegwerkzaamheden (GV. 141) en de bouw van een woning (GV. 145) redelijk voor de hand lag. De gevoeligheidskaart is nu echter beschikbaar en toont dat beide sites, ondanks hun beperkte globale hellingsgradiënt, in zones met een hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen liggen (Tabel 4.9 en Fig. 4.5). In onderstaande steekkaarten worden de uitgevoerde ingrijpende menselijke interventies verder toegelicht. Vast staat dat de grondverschuivingen geïnitieerd werden kort na de wegwerkzaamheden (GV. 141) en onmiddellijk na het graven van de kelderput (GV. 145) en dat ze wellicht niet zouden opgetreden zijn indien de oorspronkelijke morfologie van de hellingen behouden was gebleven.

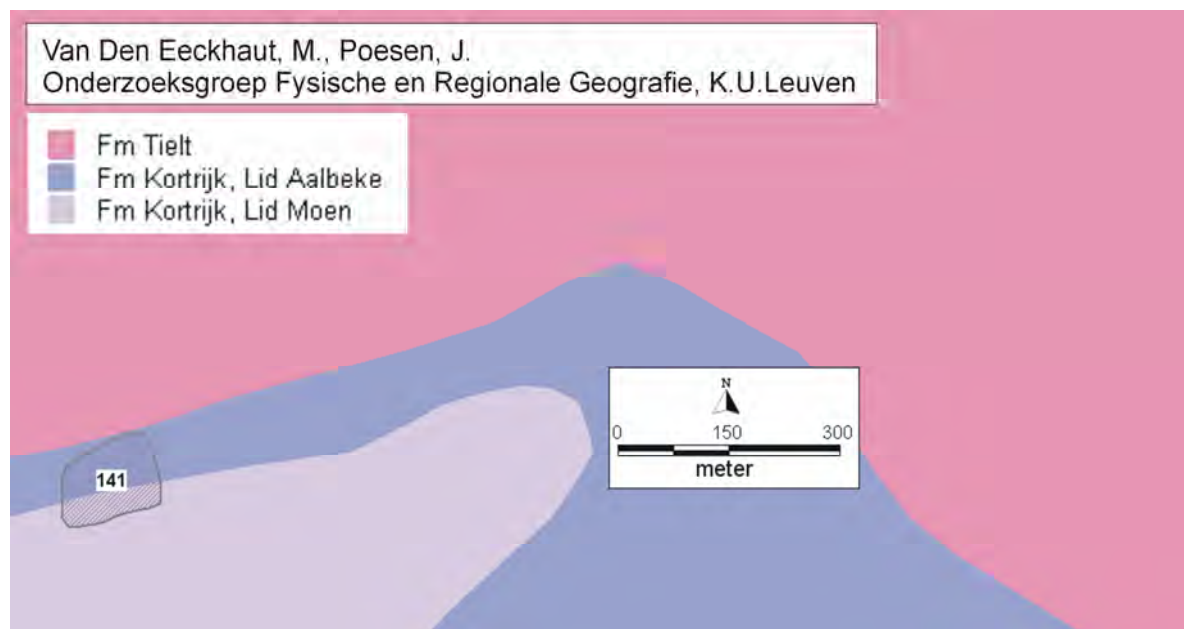
Code:	141	
Ligging:	Strijpen Gemeente: Zottegem X = 108 135 Y = 172 950	
Type:	Duidelijke grondverschuiving met een ondiep Schuifvlak Complexe verglijding	
Morfologische kenmerken van de massabeweging:	Oppervlakte (ha): 1,25 Lengte (m): 100 Breedte (m): 125 Hoogte steilrand (m): 3 Diepte glijvlak (m): < 3	
Topografische kenmerken van de site:	Gemiddelde helling site (m/m): 0,11 Oriëntatie: Z Kromming in plan: Recht - convex Kromming in profiel: Concaaf - convex	
Lithologie:	Steilrand: KoAa Grondverschuiving: KoAa	
Bodem:	Matig gedraineerde leembodem	
Hydrografie:	Bronniveau: Ja, op ongeveer 40 m boven zeeniveau Waterstagnatie / poelen: Ja Ondergraving door beek: Nee Oppervlakkige afvoer van hellingopwaarts gelegen akkers? Nee	
Landgebruik	Weide	
Historiek:	Datum van activatie / reactivatie: De grondverschuiving zou geïnitieerd zijn in 1995 of 1996, één of twee jaar na het uitvoeren van wegwerkzaamheden (zie verder). De site is sindsdien niet opnieuw gestabiliseerd. De grondverschuiving was bijvoorbeeld actief in het voorjaar van 1999, aangezien Geotechniek toen na schade aan de weg sonderingen heeft uitgevoerd. Bovendien bleken trekbarsten hellingopwaarts van de hoofdsteilrand waargenomen in februari en maart 2007 (foto 3), in juni 2007 nog in diepte en breedte toegenomen te zijn (foto 4). Tijdens dit laatste terreinbezoek was waterstagnatie waar te nemen op de bodem van deze trekbarsten.	
Menselijke ingrepen:	Volgens de pachter van de weide werden hellingopwaarts van de weide rond 1994 wegwerkzaamheden uitgevoerd. Hierbij werd extra het terrein opgehoogd en zou een bron afgedekt zijn (vermoedelijk werden drainagebuizen onder het wegdek aangebracht om dit bronwater te evacueren). De gemeente Zottegem heeft de wegwerkzaamheden bevestigd. Mogelijk beïnvloedt de aanwezigheid van de weg (N454) hellingopwaarts van de site de stabiliteit van de helling door een toename in het gewicht op de bovenhelling en door een verandering van de waterhuishouding (i.e. evacuatie van het bronwater). Recent werd een deel van de tegenhellingen in de weide opgevuld met bouwafval (foto 2) en	

	geëgaliseerd. Hierdoor wordt extra materiaal op de helling toegevoegd wat de stabiliteit verder reduceert.
Locale info DOV:	In maart 1999 werden door de Afdeling Geotechniek 10 sonderingen uitgevoerd. Vijf sonderingen werden uitgevoerd volgens een oost - west lijn ten zuiden van de weg. De overige sonderingen volgen een noordwest - zuidoost lijn dwars over de grondverschuiving.
Opmerkingen:	Deze site is een duidelijk voorbeeld van een site waar vermoedelijk geen grondverschuiving was opgetreden indien er geen menselijke ingrepen waren uitgevoerd die de stabiliteit van de site beïnvloeden. Volgens de gevoeligheidskaart ligt deze zone echter in een gebied met een zeer hoge en hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen. Dit zijn zones waarop en waarrond menselijke ingrepen zoals in dit geval het ophogen van een bovenhelling (zeker wanneer het een brongebied is) vermeden moeten worden om de stabiliteit van de sites te verzekeren.

Figuur 1 : Uitsnede uit de topografische kaart (Bron: NGI, 1972)



Figuur 2 : Uitsnede uit de geologische kaart (Bron: OC GIS-Vlaanderen, 2001)



Figuur 3 : Uitsnede uit de bodemkaart (Bron: OC GIS-Vlaanderen, 2001; eigen bewerking)

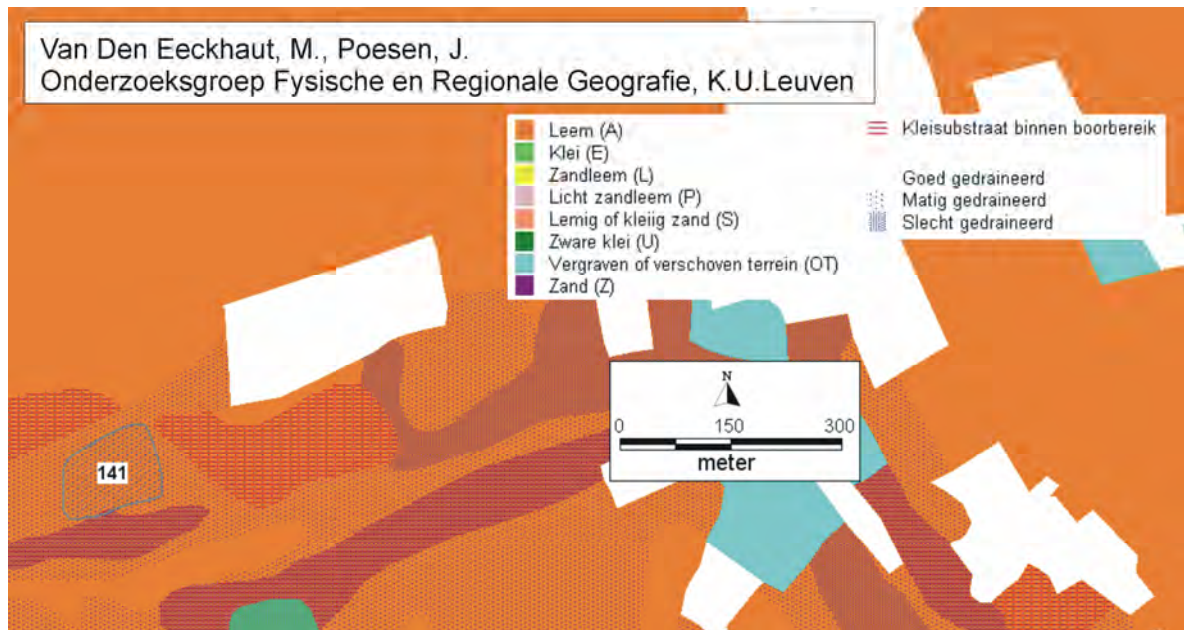


Foto 1 : Zicht op deel van hoofdsteilrand van GV. 141. Let op de weggeduwde en scheefgestelde palen in de weide en op de waterstagnatie hellingafwaarts van de hoofdsteilrand.



Foto 2 : Zicht op één van de tegenhellingen met waterstagnatie van GV. 141. Merk op dat bouwafval in de depressie werd gestort. Dit extra gewicht heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van de helling.




Foto 3: Trekbarst hellingopwaarts van GV. 141.



Foto 4 : Zelfde trekbarst als op foto 3, maar enkele maanden later. De weg ligt rechts van de foto. De persoon, centraal op de foto, die met haar been in de trekbarst zit, raakt de bodem van de barst niet. Op de bodem was waterstagnatie waar te nemen.



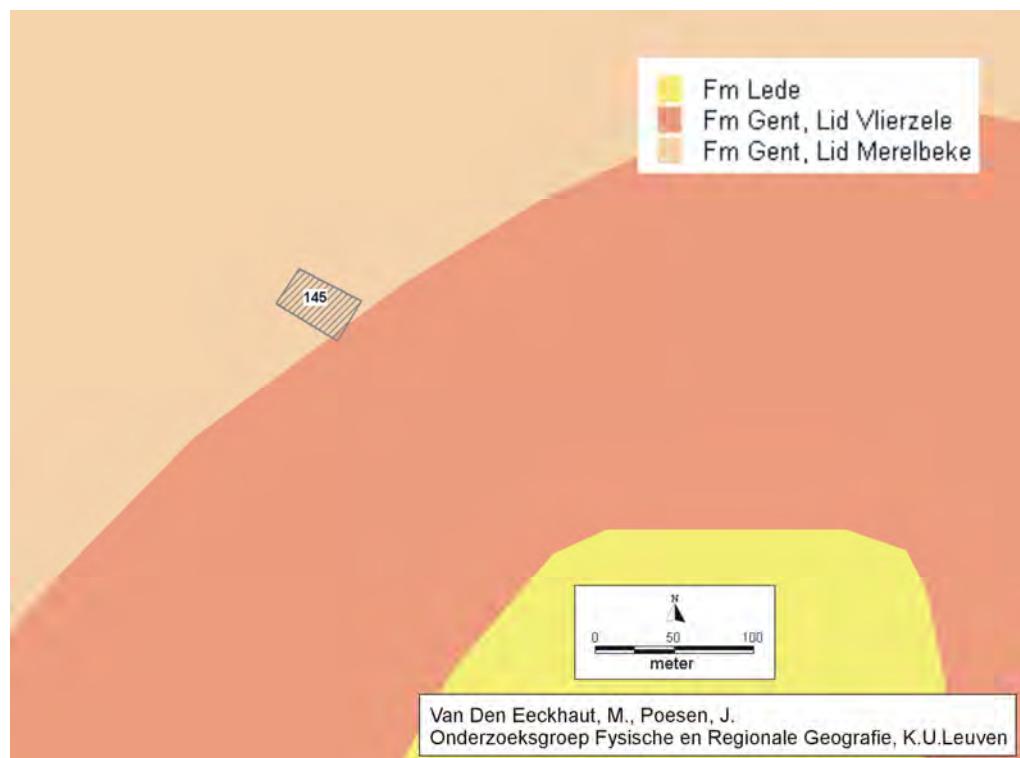
Code:	145	
Ligging:	Sint Rochus Gemeente: Herzele X = 115 780 Y = 175 775	
Type:	Duidelijke grondverschuiving met een ondiep schuifvlak	
Morfologische kenmerken van de massabeweging:	Oppervlakte (ha): 0,125 Lengte (m): 50 Breedte (m): 30 Hoogte steilrand (m): ca. 2 Diepte glijvlak (m): < 3	
Topografische kenmerken van de site:	Gemiddelde helling site (m/m): 0,08 Oriëntatie: NW Kromming in plan: Concaaf Kromming in profiel: Concaaf	
Lithologie:	Steilrand: Overgang GeVI (boven) – GeMe (onder) Grondverschuiving: GeMe	
Bodem:	Goed gedraineerde leembodem en geen informatie (bebouwd terrein)	
Hydrografie:	Bronniveau: Ja* Waterstagnatie / poelen: Nee** Ondergraving door beek: Nee Oppervlakkige afvoer van hellingopwaarts gelegen akkers?: Nee	
Landgebruik	Steilrand: Bouwperceel met hellingopwaarts onmiddellijk een weg Grondverschuiving: Bouwperceel	
Historiek:	<p>Datum van activatie / reactivatie: Voor de start van de bouwactiviteiten in het najaar van 2006, waren er vermoedelijk weinig indicaties van de hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen ter hoogte van de site. Kort na het graven van de kelderput, dienden in november 2006 de bouwwerken even stopgezet te worden omwille van de natte weersomstandigheden. In deze periode begon onmiddellijk hellingafwaarts van de weg de wand van de kelderput te verzakken. Om verdere verzakkingen en schade aan de weg te voorkomen, werd een Berlinerwand opgericht (foto 2) met 4 steunpilaren waarop stalen platen van 45 cm dik 4 m ondergronds werden gelast. Deze konden echter de verschuiving niet tegenhouden, want vrij snel na de plaatsing van de wand werd de wand weggeduwd. De laterale druk die verantwoordelijk was voor deze verplaatsing was zo groot dat materiaal onder de platen door werd opgestuwd (foto 3). Dit hellingsmateriaal bedekte een deel van het gestabiliseerd zand dat reeds gestort was voor de aanleg van de kelder (foto 1). Bij het terreinbezoek op 20 juni 2006 was de weg ter hoogte van de site afgesloten voor het verkeer.</p>	
Menselijke ingrepen:	Bij de aanleg van de Rosalie Daemstraat werd de bodem ter hoogte van de site ca. 2 m opgehoogd. Mogelijk is hierdoor het talud dat op de topografische kaart van 1972 (Fig. 1, 1:10 000) ter hoogte van de weg werd ingetekend nu niet meer duidelijk zichtbaar in het	

	<p>landschap. Waarschijnlijk werden bronnen afgedekt door het aanbrengen van het extra materiaal. Hellingopwaarts van het perceel ligt het zandige lid van Vlierzele, terwijl ter hoogte van het betreffende perceel het kleiige lid van Merelbeke dagzoomt (Fig. 2). De bronnen waren vermoedelijk het gevolg van diffuus uittredend bronwater afkomstig van de stuwwaterlaag die zich bovenop deze kleilaag heeft opgebouwd. Een belemmering van het uittreden van dit bronwater via het aanbrengen van extra bodemmateriaal en verhardingen (aanleg weg) in combinatie met het afgraven van het hellingafwaartsgelegen perceel (uitgraven van de kelderput) hebben de site sterk verstoord en de stabiliteit gereduceerd.</p>
Locale info DOV:	
Opmerkingen:	<p>* Vermoedelijk werden bronnen afgedekt bij de aanleg van de weg (zie menselijke ingrepen) ** Waterstagnatie in de bouwput was wel mogelijk op het moment van de terreinopname (juni 2007)</p> <p>Deze site is een duidelijk voorbeeld van een site waar vermoedelijk geen grondverschuiving was opgetreden indien er geen menselijke ingrepen waren uitgevoerd die de stabiliteit van de site tegenwerkten. Volgens de gevoeligheidskaart ligt deze zone echter in een gebied met een hoge (hellingopwaartse deel van de site) en matige (hellingafwaartse deel van de site) gevoeligheid voor grondverschuivingen. Dit zijn zones waarop en waarrond menselijke ingrepen zoals in dit geval het ophogen van een bovenhelling (zeker wanneer het een brongebied is) en het afgraven van de benedenhelling vermeden moeten worden om de stabiliteit van de sites te verzekeren.</p>

Figuur 1 : Uitsnede uit de topografische kaart (Bron: NGI, 1972)



Figuur 2 : Uitsnede uit de geologische kaart (Bron: OC GIS-Vlaanderen, 2001)



Figuur 3 : Uitsnede uit de bodemkaart (Bron: OC GIS-Vlaanderen, 2001; eigen bewerking)

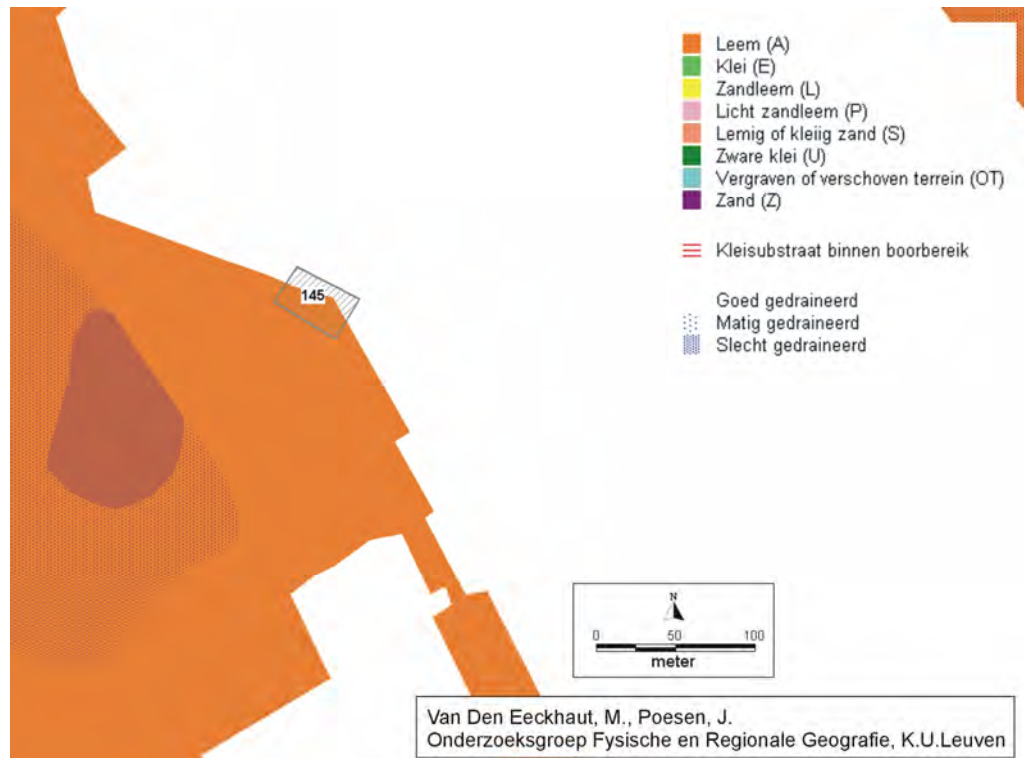


Foto 1 : Overzicht van GV. 145. Let op de artificiële berm (gedeeltelijk afgedekt met een plastic folie) die deel uitmaakt van de kelderput, de verschoven Berlinerwand en de gedeeltelijk met hellingsmateriaal bedekte laag gestabiliseerd zand.



Foto 2 : Aanleg van de Berlinerwand in november 2006 om het afschuiven van de grond te stoppen. IJzeren steunpilaren werden 4 m diep in de bodem aangebracht en hierop werden 75 cm dikke stalen platen ondergronds gelast. Merk op dat de steunpilaren op een rechte lijn staan en dat het terrein er vochtig bij ligt.



Foto 3 : Toestand in januari 2007. De Berlinerwand is weggeduwd. Verplaatsing van deze wand werd bijna onmiddellijk na het aanbrengen van de wand vastgesteld. Het terrein ligt er nog steeds vochtig bij.



Foto 4 : Toestand in juni 2007. Het terrein ligt er relatief droog bij en de steilrand werd afgedekt met een plastic folie.



Een laatste en zeer belangrijke opmerking is dat bij het nemen van een beslissing betreffende het al dan niet toelaten van bepaalde ingrepen op een site, de gevoeligheidskaart eigenlijk *nooit als enige document* mag geraadpleegd worden. Een goede besluitvorming is enkel mogelijk als *de evaluatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart gecombineerd wordt met (1) het raadplegen van ander kaartmateriaal zoals topografische, lithologische en bodemkaarten, (2) een terreinbezoek en in sommige gevallen zelfs met (3) gedetailleerde analyse van de hydrologische en bodemmechanische eigenschappen van de ondergrond op de gegeven site.*

4.5 Besluit

Vertrekkende van de informatie voor 162 in het veld waargenomen grondverschuivingen met een diep schuifvlak in de Vlaamse Ardennen, werd een nieuwe gevoeligheidskaart opgesteld. Vooral sites met relatief steile hellingen zijn gevoelig. Binnen de zones met steile hellingen zijn sites die naar het zuidoosten tot het noordwesten georiënteerd zijn en een kleirijke lithologie (zoals het lid van Merelbeke van de Formatie van Gent, de Formatie van Tielt en het lid van Aalbeke van de Formatie van Kortrijk) in de ondergrond hebben het meest gevoelig.

Wat het gebruik van de geklasseerde gevoeligheidskaart betreft, is aan te raden om menselijke ingrepen die de stabiliteit van een helling reduceren, niet enkel te vermijden op hellingsecties met een zeer hoge en hoge gevoeligheid, maar ook op sites met een matige gevoeligheid gelegen in de onmiddellijke omgeving, vooral hellingafwaarts, van zones met een zeer hoge of hoge gevoeligheid. Bovendien mag de gevoeligheidskaart nooit als enige document geraadpleegd worden bij het nemen van een beslissing omtrent een bepaalde site. Een goede besluitvorming is enkel mogelijk als de evaluatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart gecombineerd wordt met een terreinbezoek en de raadpleging van topografische kaarten, geologische kaarten en bodemkaarten.

Tabel 4.1: Overzicht van de kaarten en afgeleide variabelen die in deze analyse gebruikt werden. Alle kaarten hebben een 10 m resolutie. Voor de categorische variabelen zijn de referentiecategorieën schuingedrukt (kromming in plan: verandering van de hellingsoriëntatie gemeten langsheen een hoogtelijn; C: categorische variabele; N: numerische variabele).

Kaart		Bron
Afhankelijke variabele		
Inventariskaart van grondverschuivingen Grondverschuiving (1), geen grondverschuiving (0)	C	Van Den Eeckhaut et al. (2007)
Onafhankelijke variabelen		
Hoogte (m boven zeeniveau)	N	DHM, eigen verwerking
Lokale hellingsgradiënt (%)	N	DHM, eigen verwerking
Oriëntatie van de helling (°) Noord (N), Noordoost (NO), <i>Oost (O)</i> , Zuidoost (ZO), Zuid (Z), Zuidwest (ZW), West (W), Noordwest (NW)	C	DHM, eigen verwerking
Kromming in plan (m ⁻¹) <i>Convex</i> , vlak, <i>concaaf</i>	N	DHM, eigen verwerking
Lithologie Formatie van Diest (Di), Maldegem (Ma), Lede (Ld), Gent Vlierzele (GeVI), Gent Merelbeke (GeMe), Tielt (Tt), Kortrijk Aalbeke (Aa), <i>Kortrijk Moen (KoMo)</i> , Kortrijk Saint-Maur (KoSm)	C	OC-GIS Vlaanderen, 2001a
Bodemdrainage <i>Droog (D)</i> ; nat (N), zeer nat (ZN), geen informatie (R)	C	OC-GIS Vlaanderen, 2001b, eigen verwerking
Afstand tot rivieren en beken (m)	N	NGI, 1972, eigen verwerking
Afstand tot breuken (m)	N	De Vos et al., 1993, eigen verwerking

Tabel 4.2: Aantal puntgegevens van grondverschuivingen (GV) en niet-grondverschuivingen (niet-GV) gebruikt voor het opstellen van het nieuw logistisch regressiemodel voor het 710 km² grote studiegebied tijdens dit vervolproject.

	Totaal	Calibratie	Validatie
GV	162	121	41
Niet-GV	816	611	204
	978	732	245

Tabel 4.3: Voorbeeld van een ‘confusion matrix’ voor een bepaalde kritische kanswaarde (Eng.: cut off value) waarbij pixels met een kanswaarde groter dan deze kritische kanswaarde als een GV-pixel beschouwd worden en pixels met een kanswaarde kleiner dan deze waarde als een niet-GV-pixel beschouwd worden (TP: correct positief gemodelleerde (true positive); FN: foutief negatief gemodelleerde; (false negative); FP: foutief positief gemodelleerde (false positive); TN: correct negatief gemodelleerde (true negative); N: totaal aantal observaties).

Logistisch regressiemodel			
		1	0
Realiteit	1	TP	FN
it	0	FP	TN

% Correct geklasseerde pixels = (TP+TN)/N

Tabel 4.4: Resultaten van logistische regressie voor zeldzame gebeurtenissen voor de calibratie van een model dat de gevoeligheid voor grondverschuivingen voorspelt in het 710 km² studiegebied. Zie tabel 4.1 voor een toelichting van de variabelen.

Variabele	Coëfficiënt	St. Dev.	Pr(> z)	kansverhoudingsratio	AIC
(Intercept)	-13,4178	1,0549	<2e-16 (***)		658,4
Hellingsgradiënt	0,3863	0,0379	<2e-16 (***)	1,47	292,1
W	2,9477	0,6514	7e-06 (***)	19,06	286,2
NW	2,5204	0,6288	7e-05 (***)	12,43	280,5
GeVI	2,3365	0,6819	0,00065 (***)	10,34	277,3
Z	2,3987	0,6788	0,00044 (***)	11,01	273,5
ZW	2,0430	0,6800	0,00275 (**)	7,71	268,3
Tt	1,4883	0,4780	0,00192 (**)	4,43	266,2
KoAa	1,3807	0,5389	0,01060 (*)	3,98	263,5
GeMe	2,4072	0,8417	0,00436 (**)	11,10	259,0
ZO	1,6530	0,8412	0,04980 (*)	5,22	257,2

Significantie codes: 0 (***) ; 0,001 (**); 0,01 (*)

St. Dev. Standaard deviatie

Pr(>|z|): Onbetrouwbaarheid of de kans dat de nulhypothese, H₀, onterecht wordt verworpen (hier is de H₀: de coëfficiënt is 0; wanneer de Pr(>|z|) groter is dan de significantiecode 0,05 is de kans grote dat deze hypothese verkeerdelijk verworpen wordt)

AIC: Akaike's Informatie Criterium

Tabel 4.5: Akaike's Informatie Criterium (AIC) van 10 opeenvolgende univariate logistische regressiemodellen laten toe om de significante onafhankelijke variabelen te ordenen volgens belang van bijdrage aan het nieuwe logistische regressiemodel (vgl. 11).

Belang	Variabele	AIC
	(Intercept)	658,4
1	Hellingsgradiënt	292,1
2	KoAa	643,5
3	W	643,7
4	ZO	646,4
5	NW	651,8
6	Tt	655,5
7	ZW	656,9
8	GeMe	660,0
	GeVI	660,0
	Z	660,0

Tabel 4.6: Classificatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen (GV) in het 710 km² grote studiegebied en validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart door confrontatie met de 162 grote GV met een diep (> 3 m) schuifvlak. Voor de 4 gevoeligheidsklassen wordt de verdeling voor het studiegebied, voor de erosiezones en voor de ganse grondverschuivingen (erosie- en accumulatiezones) weergegeven.

Kanswaarde interval	Gevoeligheid voor GV	% Studiegebied (710 km ²)		% Erosiezone		% Ganse grondverschuiving	
			Cum*		Cum*		Cum*
0,02-1	Zeer hoog	1,5	1,5	73,8	73,8	29,8	29,8
0,004-0,02	Hoog	3,0	4,5	15,9	89,7	29,0	58,8
0,001-0,004	Matig	7,0	11,5	7,6	97,3	25,2	84,0
0-0,001	Laag	88,5	100,0	2,7	100,0	16,0	100,0

* Cumulatief

Tabel 4.7: Classificatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen (GV) in het 710 km² grote studiegebied en validatie van de geklasseerde gevoeligheidskaart door confrontatie met de 57 GV met een ondiep (< 3 m) schuifvlak die tijdens het vervolgproject gekarteerd werden. Voor de 4 gevoeligheidsklassen wordt de verdeling voor het hele studiegebied en voor de ganse grondverschuivingen (erosie- en accumulatiezones) weergegeven. Omwille van hun beperkte afmetingen werd geen afzonderlijke erosiezone afgebakend.

Kanswaarde interval	Gevoeligheid voor GV	% Studiegebied (710 km ²)		% Ganse grondverschuiving	
			Cum*		Cum*
0,02-1	Zeer hoog	1,5	1,5	31,5	31,5
0,004-0,02	Hoog	3,0	4,5	31,5	63,0
0,001-0,004	Matig	7,0	11,5	19,5	82,5
0-0,001	Laag	88,5	100,0	17,5	100,0

* Cumulatief

Tabel 4.8: Procentuele verdeling van de pixels van 45 nieuw gekarteerde grondverschuivingen met een diep (> 3 m) schuifvlak over de vier gevoeligheidsklassen. Deze grondverschuivingen werden door analyse van LIDAR-afgeleide kaarten in combinatie met terreinverificatie gekarteerd in het 510 km² grote uitbreidingsgebied (zie Fig. 3.4 voor de ligging van de grondverschuivingen).

Code	Naam van site	Gemeente	Gevoeligheid (%)				Totaal
			Zeer hoog	Hoog	Matig	Laag	
34	Perreveld	Brakel	39,6	33,2	17,0	10,3	100
39	Livierenbos	Brakel	64,3	35,7	0,0	0,0	100
40	Livierenbos	Brakel	33,3	47,0	15,3	4,3	100
41a	Livierenbos	Brakel	40,1	30,6	21,3	7,9	100
41b	Livierenbos	Brakel	42,3	32,5	17,2	8,0	100
42a	Livierenbos	Brakel	32,7	38,6	27,7	0,9	100
42b	Livierenbos	Brakel	39,0	29,4	26,0	5,6	100
47a	Brakelbos	Brakel	7,0	35,6	30,9	26,6	100
47c	Brakelbos	Brakel	28,1	51,0	14,6	6,3	100
48	Pullem	Brakel	44,4	28,5	26,4	0,7	100
49	Pullem	Brakel	45,0	38,2	16,8	0,0	100
50	Trimpont	Brakel	22,5	27,7	33,1	16,8	100
56a	Kanakkendries	Brakel	43,1	29,9	18,2	8,7	100
56c	Kanakkendries	Brakel	61,9	38,1	0,0	0,0	100
69a	Arme Kleie	Brakel	65,4	21,5	10,1	3,0	100
69b	Arme Kleie	Brakel	90,5	8,1	1,4	0,0	100
70	Dompels	Brakel	26,2	26,7	32,9	14,2	100
72a	Boterhoek	Brakel	10,0	26,3	46,0	17,7	100
72b	Boterhoek	Brakel	58,7	41,3	0,0	0,0	100
73a	Kapittel	Brakel	50,7	39,9	9,5	0,0	100
73b	Kapittel	Brakel	40,9	59,1	0,0	0,0	100
73c	kapittel	Brakel	4,5	10,2	38,2	47,1	100
108	Rovorst	Brakel	19,8	38,8	28,0	13,4	100
139a	Hauwstraat	Brakel	90,6	6,3	3,1	0,0	100
139c	Hauwstraat	Brakel	25,9	74,1	0,0	0,0	100
131	Bosberg	Geraardsbergen	48,8	25,1	14,3	11,8	100
131r	Bosberg	Geraardsbergen	100,0	0,0	0,0	0,0	100
132a	Bosberg	Geraardsbergen	100,0	0,0	0,0	0,0	100
132b	Bosberg	Geraardsbergen	100,0	0,0	0,0	0,0	100
135	Oudenberg	Geraardsbergen	50,4	18,0	22,6	9,0	100
135r	Oudenberg	Geraardsbergen	100,0	0,0	0,0	0,0	100
136	Oudenberg	Geraardsbergen	48,2	13,3	13,3	25,3	100
140b	Oudenberg	Geraardsbergen	27,1	21,6	30,4	20,9	100
140a	Oudenberg	Geraardsbergen	74,3	20,6	5,0	0,2	100
137	Nauw	Herzele	91,3	8,8	0,0	0,0	100
142a	Duivenbos	Herzele	10,3	29,7	43,2	16,8	100
142b	Sint-Antelicks	Herzele	91,8	8,2	0,0	0,0	100
82a	Uilenbroek	Lierde	27,2	42,3	27,8	2,7	100
55	Kloosterbos	Zottegem	16,7	61,8	18,4	3,1	100
81a	Ten Eden	Zottegem	51,8	40,0	7,1	1,1	100
81b	Ten Eden	Zottegem	75,0	25,0	0,0	0,0	100
81c	Ten Eden	Zottegem	100,0	0,0	0,0	0,0	100
81d	Ten Eden	Zottegem	33,1	62,8	4,1	0,0	100
83	Potaardeberg	Zottegem	50,0	36,8	10,4	2,8	100
138	Klein Holland	Zottegem	59,1	34,8	6,1	0,0	100
Gemiddelde			50,7	28,8	14,1	6,3	
St. Dev.			28,3	17,9	13,5	9,7	

Tabel 4.9: Procentuele verdeling van pixels van de 15 nieuw gekarteerde grondverschuivingen met een ondiep (< 3 m) schuifvlak over de vier gevoeligheidsklassen. Deze grondverschuivingen werden gekarteerd tijdens terreinbezoeken in het 510 km² grote uitbreidingsgebied (zie Fig. 3.4 voor de ligging van de grondverschuivingen).

Code	Naam van site	Gemeente	Gevoeligheid (%)				Totaal
			Zeer hoog	Hoog	Matig	Laag	
35a	Perreveld	Brakel	100,0	0,0	0,0	0,0	100
35b	Perreveld	Brakel	100,0	0,0	0,0	0,0	100
35c	Perreveld	Brakel	100,0	0,0	0,0	0,0	100
35d	Perreveld	Brakel	83,3	5,6	5,6	5,6	100
40b	Livierenbos	Brakel	100,0	0,0	0,0	0,0	100
47b	Brakelbos	Brakel	11,7	34,7	21,1	32,5	100
50?	Trimpont	Brakel	26,7	43,3	13,3	16,7	100
56b	Kanakkendries	Brakel	16,7	0,0	16,7	66,7	100
56d	Kanakkendries	Brakel	100,0	0,0	0,0	0,0	100
139b	Hauwstraat	Brakel	71,4	28,6	0,0	0,0	100
143a	Sint-Kristianabr	Gavere	29,1	15,5	45,5	10,0	100
143b	Diepestraat	Gavere	100,0	0,0	0,0	0,0	100
145	St. Rochus	Herzele	0,0	53,1	46,9	0,0	100
82b	Oudenhove	Lierde	87,5	12,5	0,0	0,0	100
141	Strijpen	Zottegem	0,0	52,4	12,1	35,5	100
		Gemiddelde	61,8	16,4	10,7	11,1	
		St. Dev.	41,8	20,5	16,1	19,5	

Tabel 4.10: Procentuele verdeling van pixels van de 21 sites zonder duidelijke sporen van een grondverschuiving over de vier gevoeligheidsklassen. Deze sites werden geselecteerd in het 510 km² grote uitbreidingsgebied (zie paragraaf 3.1.2.C voor de selectiecriteria en figuur 4.6 voor de ligging van de sites).

Code	Naam van site	Gemeente	Zeer hoog	Hoog	Matig	Laag	Totaal
S1	Oorloge	Brakel	4,7	18,0	38,4	38,8	100,0
S2	Twaalfbunder	Brakel	47,4	24,8	27,7	0,0	100,0
S3	Valkenberg	Brakel	0,0	20,0	20,0	60,0	100,0
S4	Michelbeke	Brakel	0,2	4,1	52,5	43,3	100,0
S5	Marebeek	Brakel	12,8	36,0	47,2	4,0	100,0
S6	Dikkelvenne	Gavere	0,0	48,0	48,7	3,3	100,0
S7	Gapenberg	Geraardsbergen	6,8	20,9	24,6	47,7	100,0
S8	Bovenhoek	Geraardsbergen	78,2	8,6	7,3	5,9	100,0
S9	Onkerzele	Geraardsbergen	30,9	5,8	4,9	58,4	100,0
S10	Hillegem	Herzele	0,0	0,0	1,7	98,3	100,0
S11	Hillegem	Herzele	0,0	0,0	1,6	98,4	100,0
S12	De Keer	Wortegem-Petegem	0,9	22,0	29,9	47,2	100,0
S13	Pareel 1	Wortegem-Petegem	0,5	21,9	28,6	49,0	100,0
S14	Pareel 2	Wortegem-Petegem	0,0	13,3	52,7	34,0	100,0
S15	Velzeke 1	Zottegem	0,0	23,4	38,5	38,1	100,0
S16	Velzeke 2	Zottegem	7,2	53,6	31,9	7,2	100,0
S17	Nauw	Zottegem	72,2	25,9	1,9	0,0	100,0
S18	Boterhoekbeek	Zottegem	5,0	48,9	42,4	3,7	100,0
S19	Karnemelkbeek	Zottegem	72,8	12,2	7,2	7,8	100,0
S20	Erwetegembeek	Zottegem	2,2	68,9	17,2	11,7	100,0
S21	Klein Holland	Zottegem	6,0	36,0	33,8	24,2	100,0
		Gemiddelde	16,6	24,4	26,6	32,4	
		St. Dev.	26,8	18,5	17,5	30,1	

Fig. 4.1: Evaluatie van het nieuw logistisch regressiemodel (vgl. 11): Sensitiviteit, specificiteit, correct geklasseerde pixels en PABAK-waarde voor verschillende kritische kanswaarden. Zowel voor de calibratie- als validatiedataset werden de beste resultaten (i.e. hoogste fractie correct geklasseerde GV- en niet-GV-pixels en hoogste PABAK-waarde) bekomen voor een kritische kanswaarde $p=0,02$

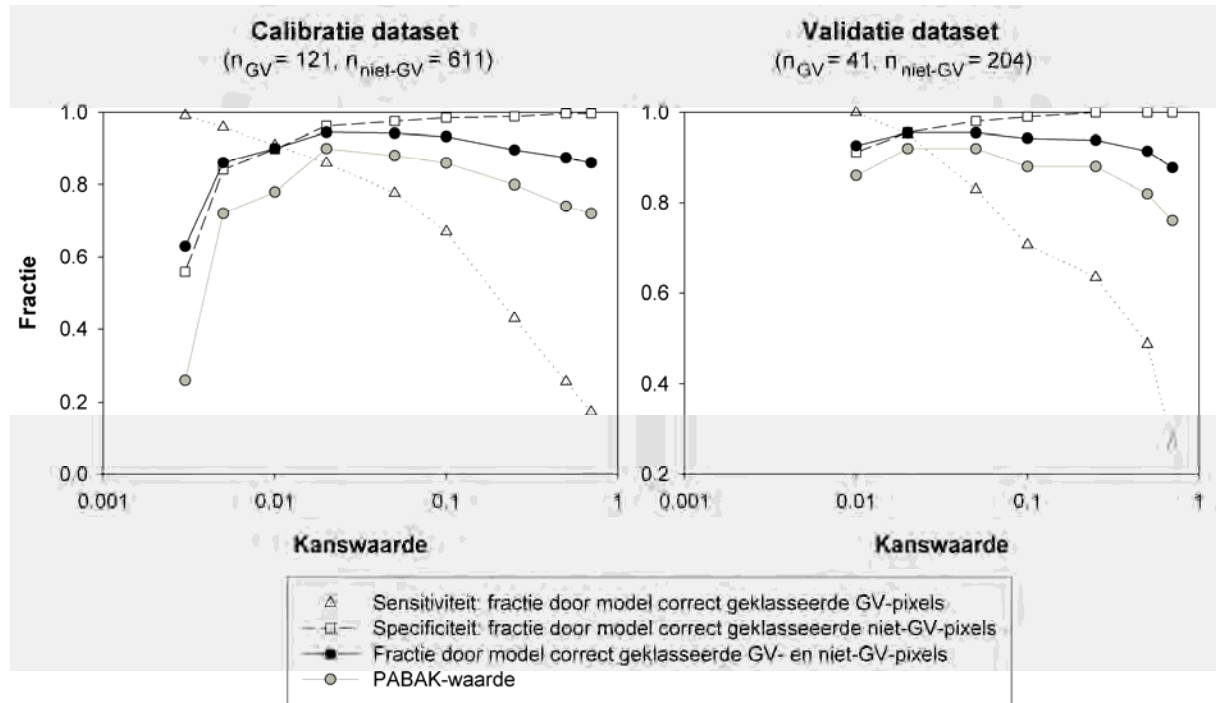
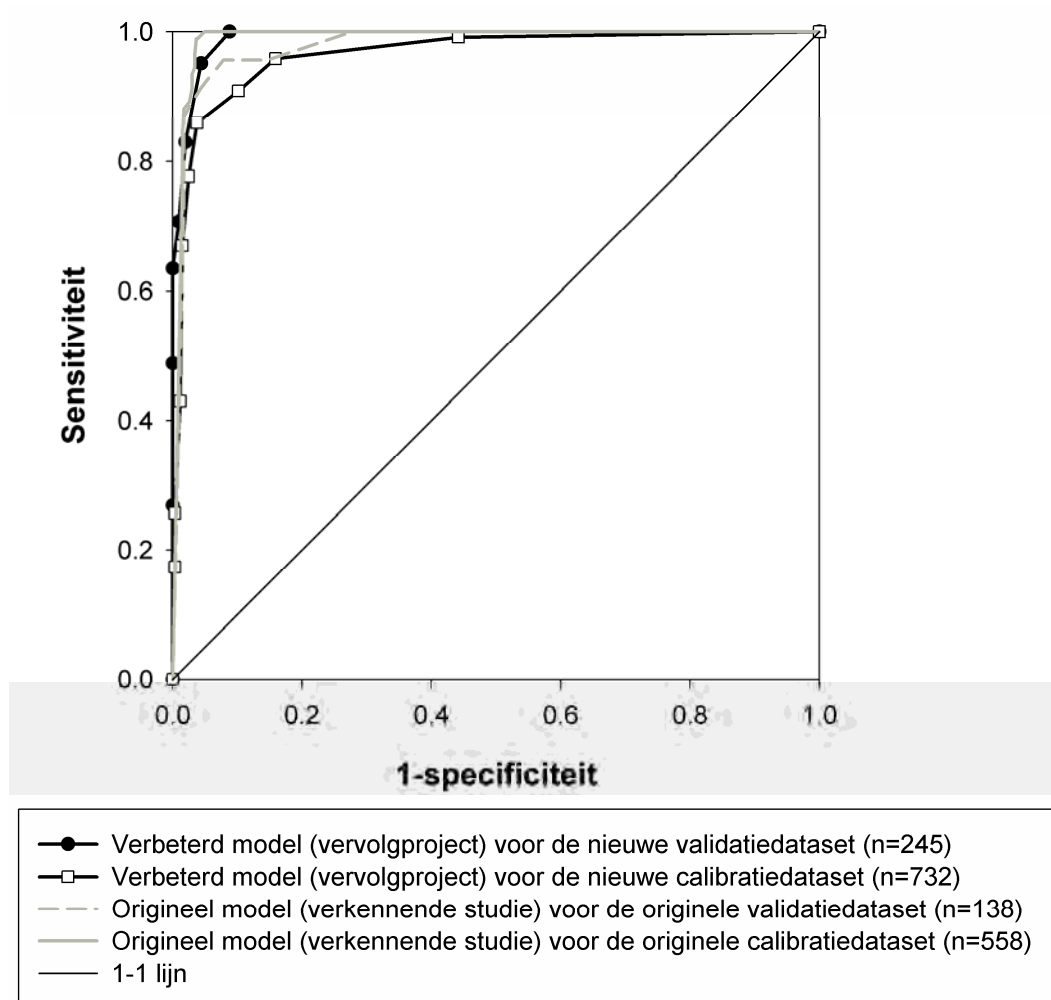
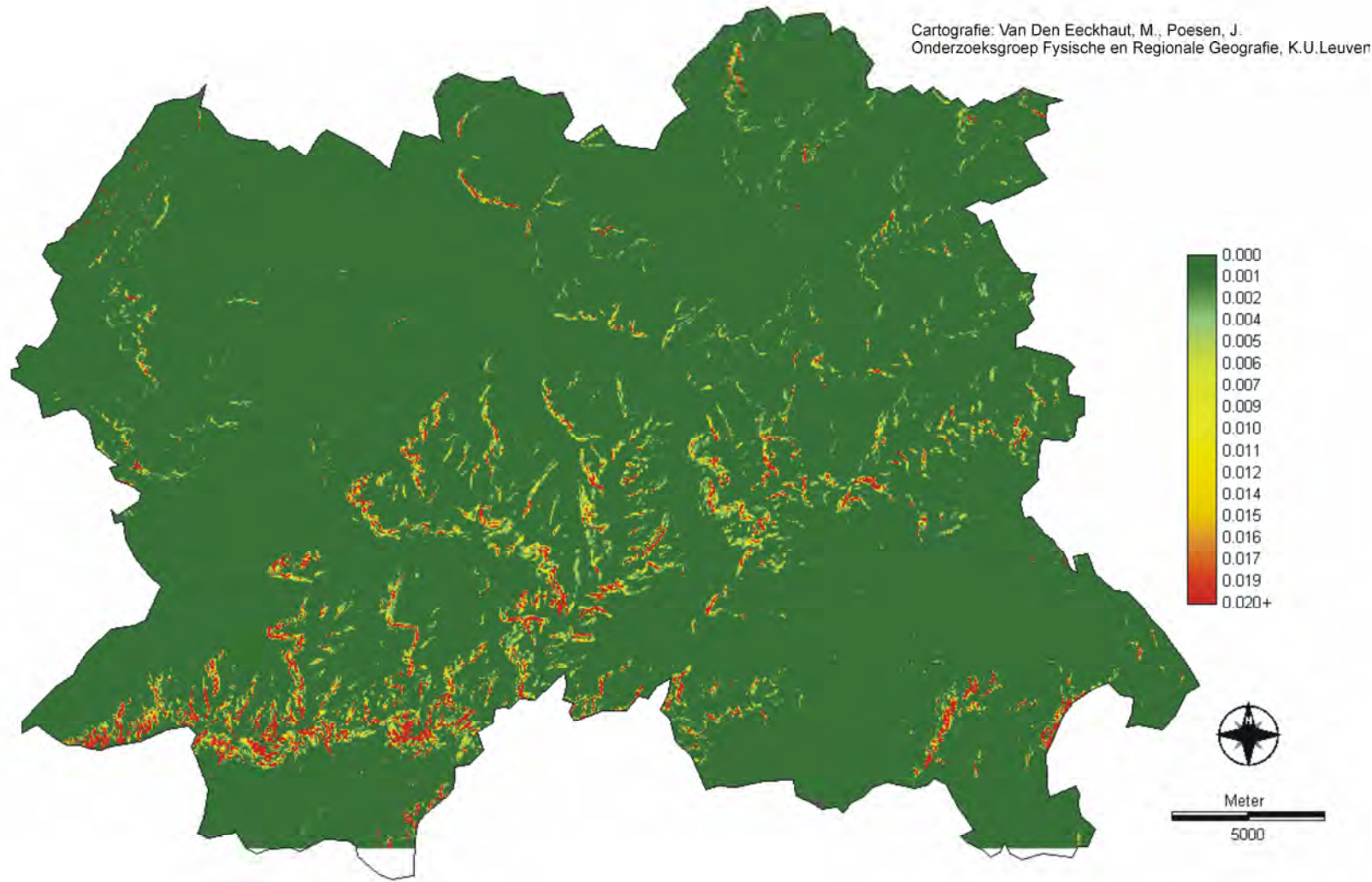


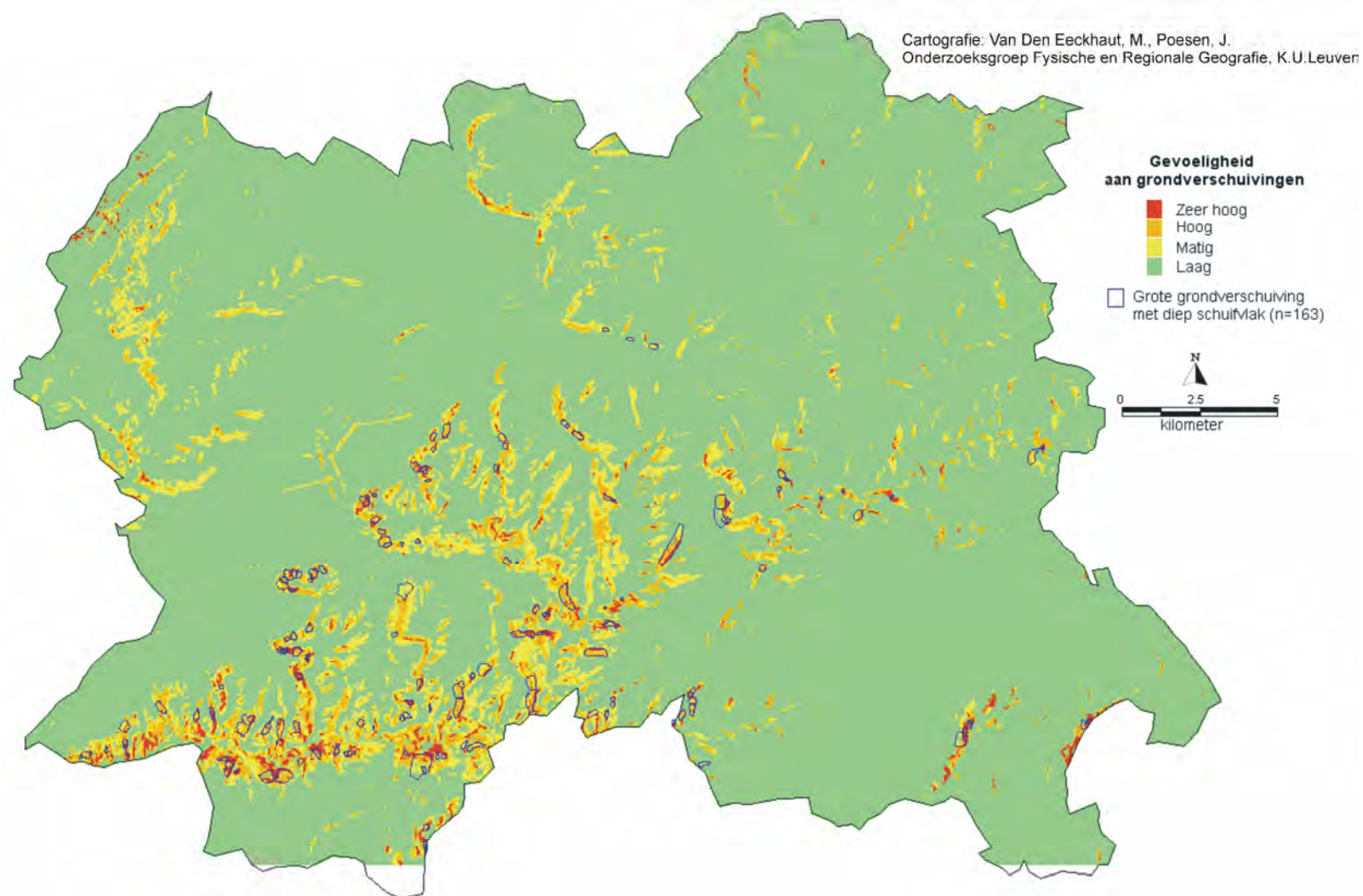
Fig. 4.2: ROC-curve voor de validatie en calibratiedatasets van het nieuwe, verbeterde (dit vervolgproject) en het originele (verkennende studie, Van Den Eeckhaut et al., 2005) model. Hoe meer de relatie tussen '1-specificiteit' en 'sensitiviteit' evolueert van (0,0) over (0,1) naar (1,1), hoe beter het model. De ROC-curves tonen bijgevolg dat het nieuwe model opgesteld voor het 710 km² grote studiegebied van een zeer hoge kwaliteit is



Figuur 4.3: Ruimtelijke spreiding van de gevoeligheid voor grondverschuivingen in het studiegebied (710 km²) in de Vlaamse Ardennen. Kanswaarden, op basis van het nieuwe logistische regressiemodel voor zeldzame gebeurtenissen, variëren van 0 (niet gevoelig voor grondverschuivingen) tot 1 (zeer gevoelig voor grondverschuivingen)



Figuur 4.4: Nieuwe geklasseerde gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in het studiegebied (710 km²) in de Vlaamse Ardennen



Figuur 4.5: Confrontatie van de grondverschuivingen met een ondiep schuifvlak en de nieuwe geklasseerde gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen in het studiegebied (710 km²) in de Vlaamse Ardennen. De detailkaarten tonen de gevoeligheid van GV. 143a en b (Gavere) en GV. 145 (Sint-Rochus, Herzele)

Cartografie: Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J.
Onderzoeksgroep Fysische en Regionale Geografie, K.U.Leuven

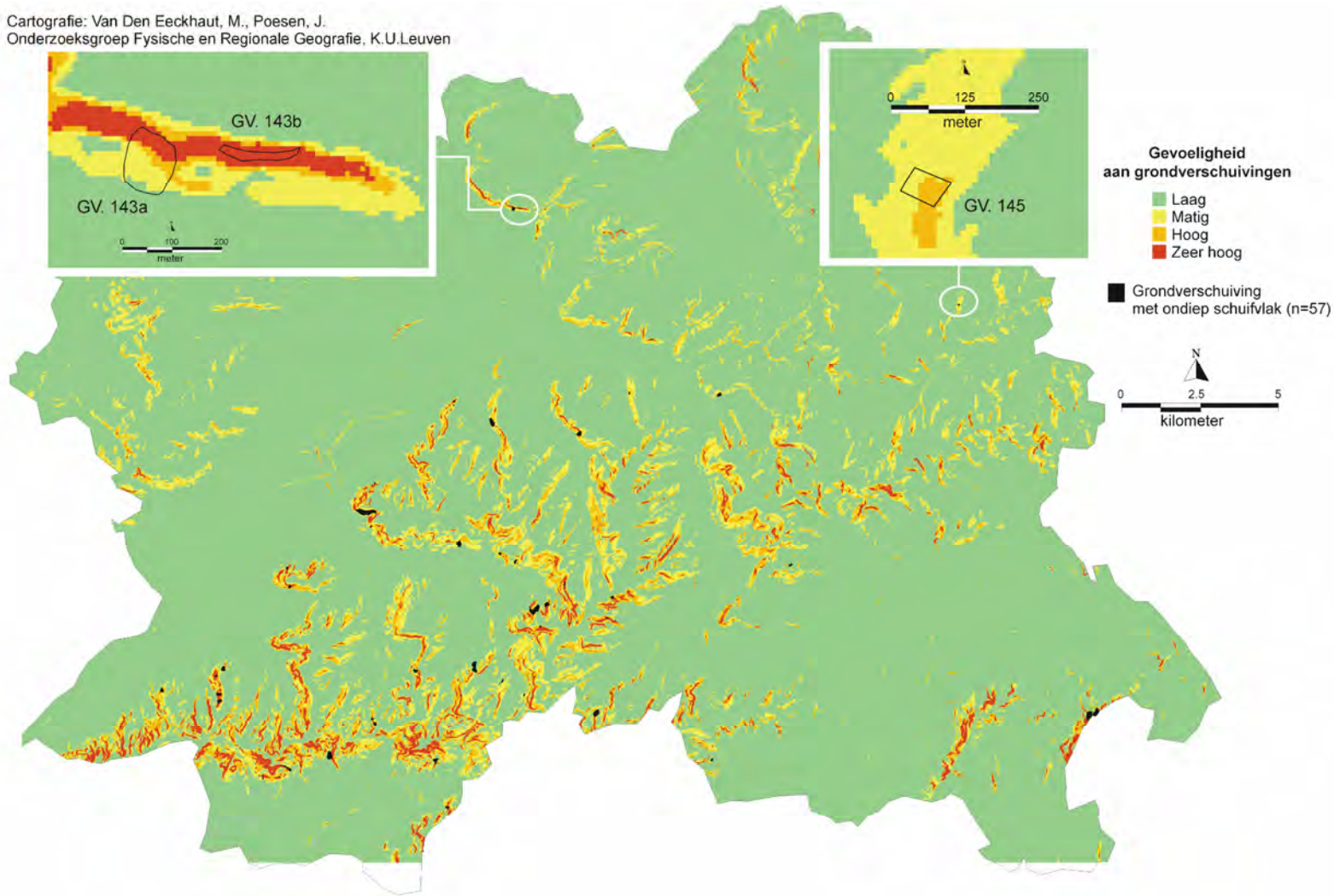


Fig. 4.6: Ligging van 21 sites zonder duidelijke sporen van een grondverschuiving in het studiegebied (zie paragraaf 3.1.2.C voor de selectiecriteria)

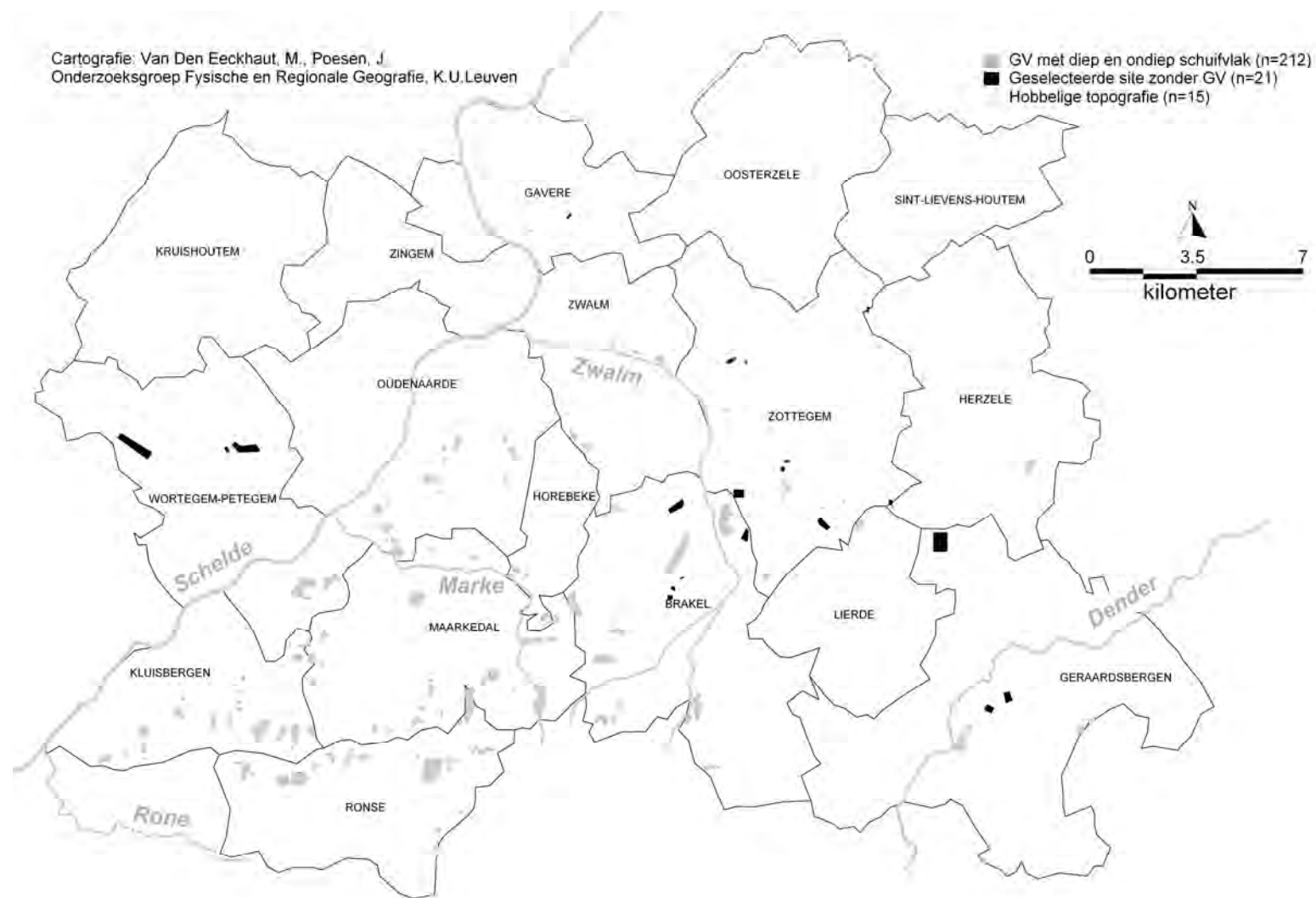


Fig. 4.7: Uitsnede van de nieuwe gevoeligheidskaart ter hoogte van GV. 70 (Dompels; Brakel) met de topografische kaart als onderliggende kaart. De zwarte lijn omsluit de grondverschuiving (GV) zoals gekarteerd op het terrein. De hoofdsteilrand ligt in een zone met een zeer hoge gevoeligheid zoals aangegeven op de nieuwe gevoeligheidskaart. Ter hoogte van de tegenhellingen en vervlakingen hellingafwaarts van de steilrand wordt aan de helling slechts een matige gevoeligheid toegekend. Dit voorbeeld maakt duidelijk dat bij de evaluatie van hellingsecties met een matige gevoeligheid steeds moet gecontroleerd worden of er hellingopwaarts geen zone met een zeer hoge of hoge gevoeligheid (i.e. huidige of toekomstige erosiezone) ligt. Indien dit het geval is, kunnen menselijke ingrepen op en in de onmiddellijke omgeving van de helling aanleiding geven tot een reactivatie van de GV.

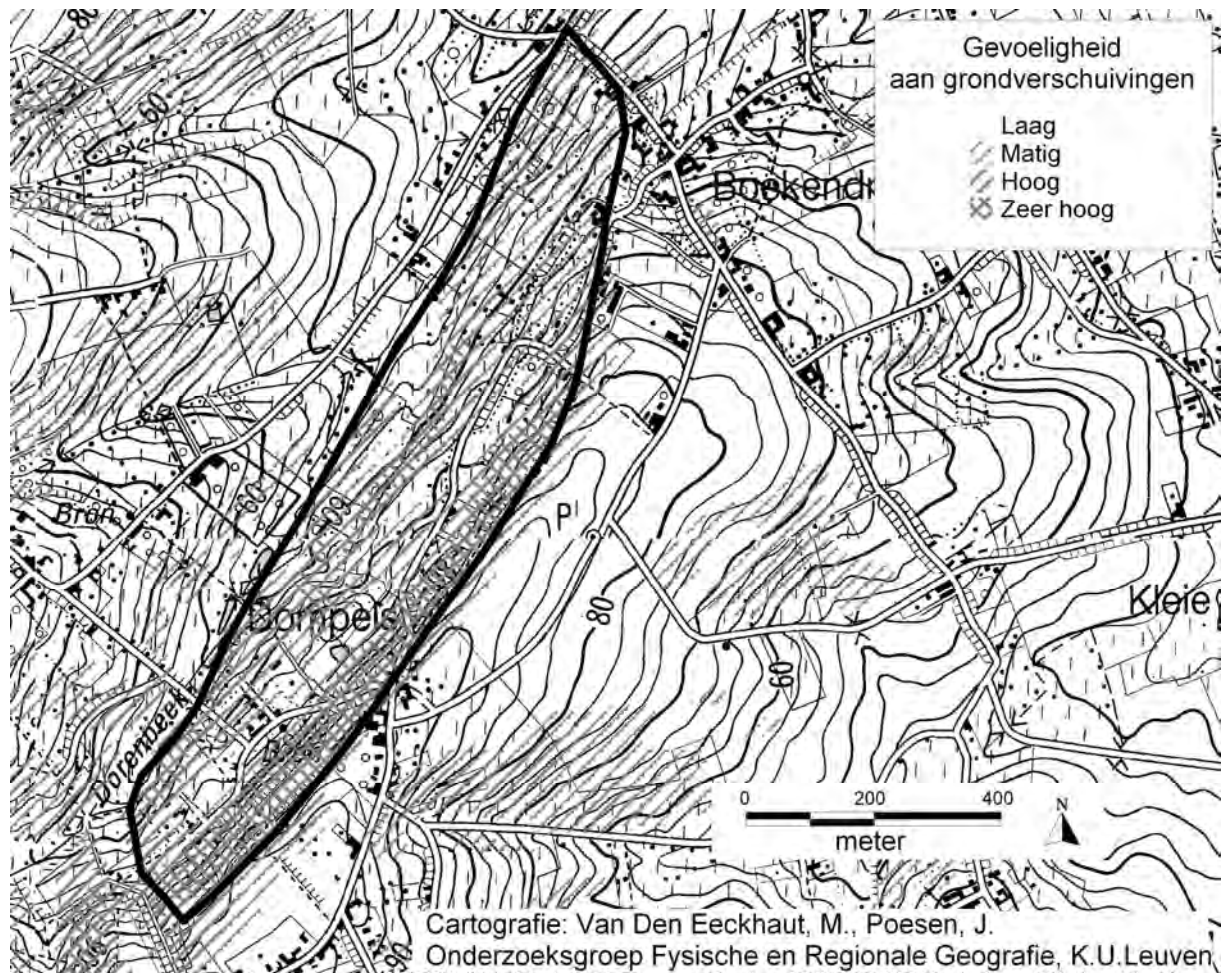


Fig. 4.8: Uitsnede van de nieuwe gevoeligheidskaart ter hoogte van GV. 48 en 49 (Pullem; Brakel) met de topografische kaart als onderliggende kaart. De zwarte lijn omsluit de grondverschuivingen (GV) zoals gekarteerd op het terrein. Voor beide GV ligt de hoofdsteilrand in een zone met een zeer hoge gevoeligheid, zoals aangegeven op de nieuwe gevoeligheidskaart. Ter hoogte van de vervlakkingen hellingafwaarts van de steilrand en in de accumulatiezone wordt aan de helling een hoge gevoeligheid toegekend. Merk op dat de hellingen ten noorden en ten zuiden van GV. 49, op eenzelfde hoogte als de accumulatiezone, nog steeds een zeer hoge gevoeligheid hebben. In dit geval heeft de aanwezigheid van GV. 49 geleid tot een lichte afname van de hellingsgradiënt waardoor het model een iets lagere gevoeligheid voorspelt

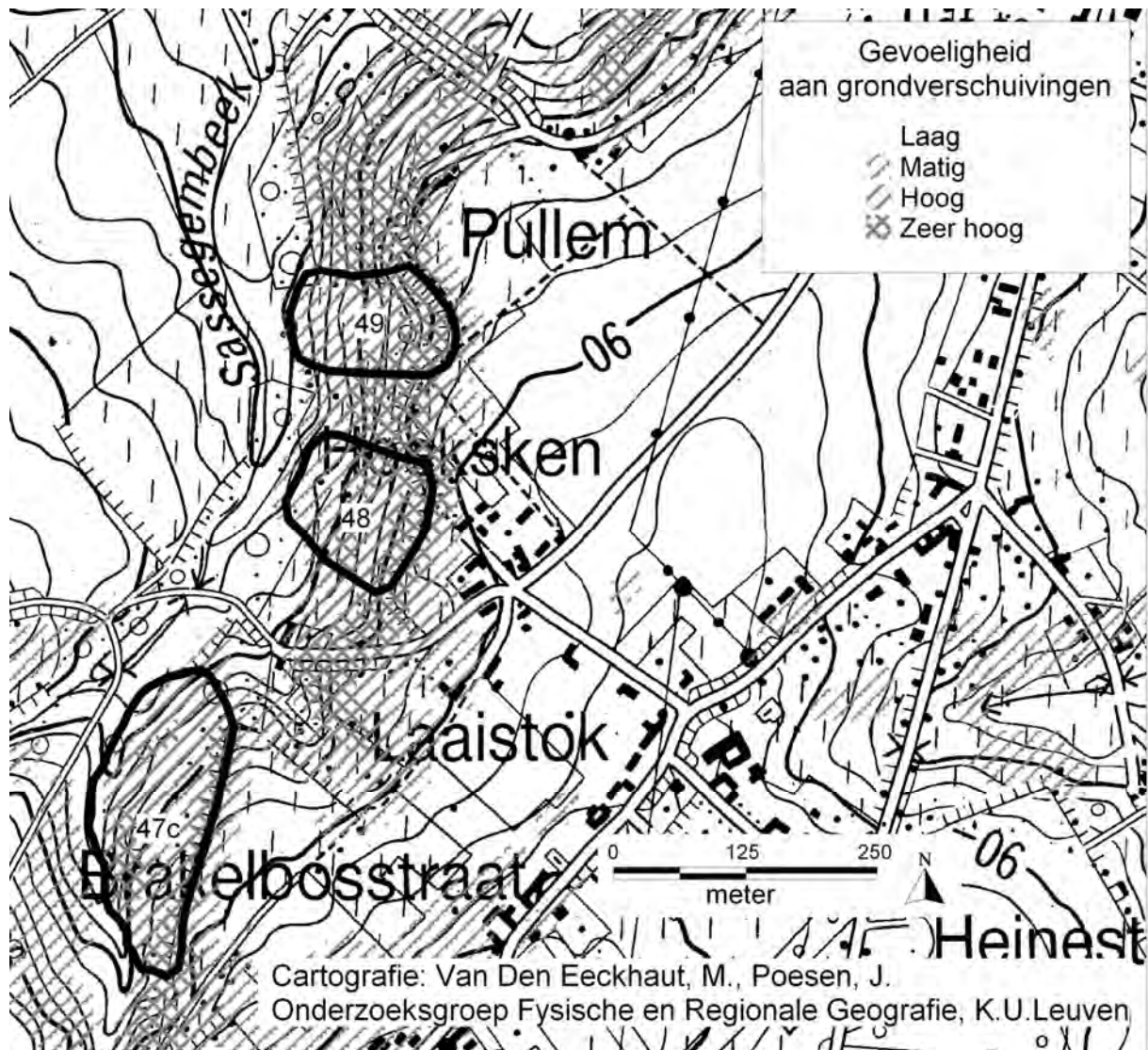


Fig. 4.9: Uitsnede van de nieuwe gevoeligheidskaart ter hoogte van Bovenhoek (Geraardsbergen) met de topografische kaart als onderliggende kaart. De zwarte lijn omsluit bezochte site S8 en S9 waar geen duidelijke sporen van een grondverschuiving werden vastgesteld op het terrein. Toch werd aan de naar het zuidwesten tot noordwesten gerichte hellingsecties een zeer hoge tot hoge gevoeligheid voor grondverschuivingen toegekend. Menselijke ingrepen die de stabiliteit van deze hellingsecties reduceren, dienen vermeden te worden

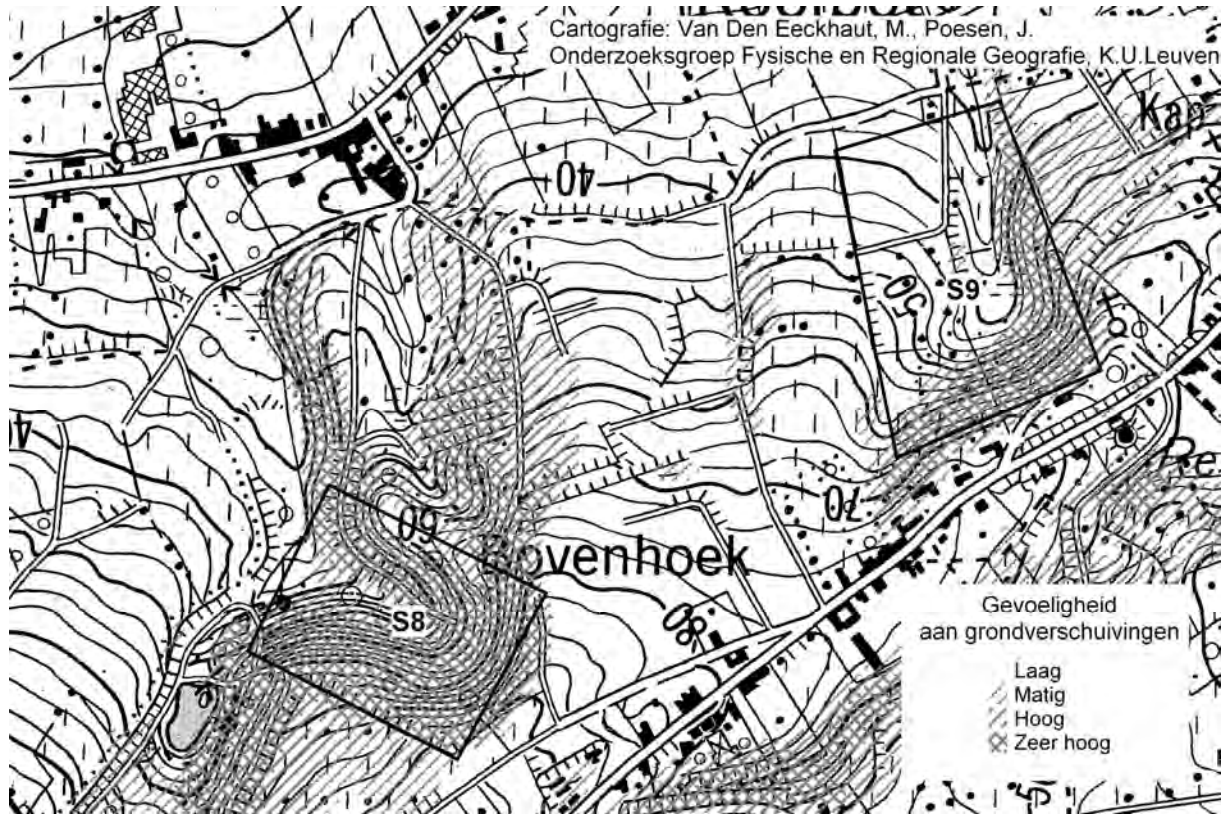
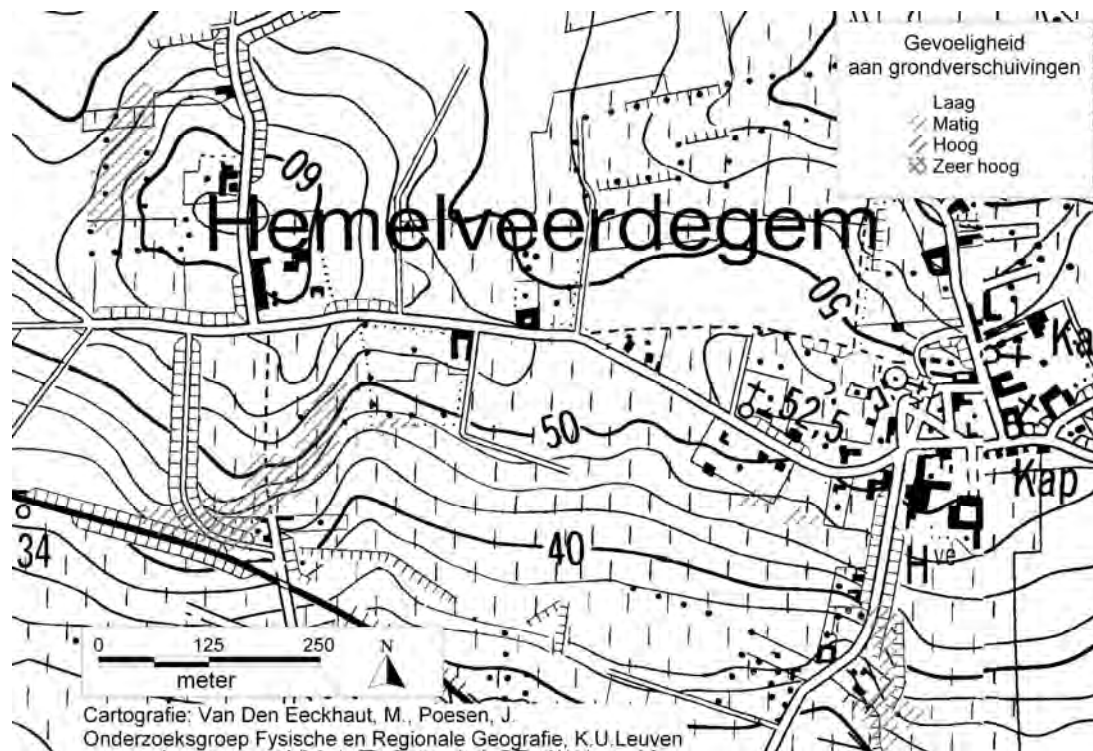


Fig. 4.10: Uitsnede van de nieuwe gevoeligheidskaart ter hoogte Hemelveerdegem (Lierde) met de topografische kaart als onderliggende kaart. De kleine geïsoleerde zones met een matige gevoeligheid voor grondverschuivingen zijn vermoedelijk te wijten aan een kleine, lokale toename van de hellingsgradiënt. Ten zuiden van de dorpskern is een door de mens aangelegde talud de oorzaak van deze toename van de lokale helling. (Deze site hoort niet tot de 21 bezochte sites waarvoor op het terrein geen sporen van grondverschuivingen werden waardenomen)



Bibliografie

Allison, P.D., 2001. Logistic regression using the SAS system: theory and application. Wiley interscience, pp. 288.

Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology* 65 (1-2) 15-31.

Bogemans, F., 1999. Toelichting bij de Kwartair geologische kaart, kaartblad 30 Geraardsbergen, schaal 1/50000. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, pp. 40.

Bogemans, F., 2002. Toelichting bij de Kwartair geologische kaart, kaartblad 29 Kortrijk, schaal 1/50000. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, pp. 49.

Byrt, T., Bishop, L., Carlin, J.B., 1993. Bias, prevalence and kappa. *J. Clin. Epidemiol.* 46, 423-429.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal* 2, 172-183.

Imai, K., King, G., Lau, OK, 2005. Zelig everyone's statistical software. Version 2.1-3, pp. 197.

I.W.O.N.L., 1987. Verklarende tekst bij de bodemkaart van België, Kaartblad 98E Ronse. Uitgegeven onder de auspiciën van het Instituut tot aanmoediging van het Wetenschappelijk Onderzoek in Nijverheid en Landbouw, pp. 163.

Jacobs, P., De Ceukelaire, M., De Breuck, W., De Moor, G., 1999a. Toelichting bij de geologische kaart van België, Vlaams gewest, kaartblad 29 Kortrijk, schaal 1/50000. Ministerie van Economische zaken en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, pp. 68.

Jacobs, P., Van Lancker, V., De Ceukelaire, M., De Breuck, W., De Moor, G., 1999b. Toelichting bij de geologische kaart van België, Vlaams gewest, kaartblad 30 Geraardsbergen, schaal 1/50000. Ministerie van Economische zaken en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, pp. 58.

King, G., Zeng, L., 2001. Logistic regression in rare events data. *Political Analysis* 9 (2), 137-163.

Lasko, T.A., Bhagwat, J.G., Zou, K.H., Ohno-Machado, L., 2005. The use of receiver operating characteristic curves in biomedical informatics. *Journal of Biomedical Informatics* 38, 404-415.

Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 687-711.

Mercier-Castiaux, M. and Dupuis, C., 1990. Clay mineral associations in the Ypresian formations in the NW European basin : Time and geographical variations – interpretations. *Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie* 97 (3/4): 441 – 450.

SAS Online doc (<http://v8doc.sas.com/sashtml/>).

Vanacker V., Vanderschraeghe, M., Govers G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andes watersheds. *Geomorphology* 52, 299-315.

Van Den Eeckhaut, M., 2006. Spatial and temporal patterns of landslides in hilly regions – the Flemish Ardennes (Belgium). Ph.D. thesis, Faculty of Science, K.U.Leuven, Belgium, pp. 250. ISBN 90-8649-010-7.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., 2005. Verkennde studie met betrekking tot massabewegingen in de Vlaamse Ardennen. Deel I : Studiegebied, literatuurstudie, inventarisatie en classificatie (+steekkaarten), statistische en ruimtelijke analyse en methodology voor het ontwerp van een risicokaart. Rapport in Opdracht van de Vlaamse Gemeenschap, AMINAL, Afdeling Land, Brussels, pp. 154.

Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium), *Geomorphology* 76, 392-410.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Acker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., Van Beek, L.P.H., Vandekerckhove, L., 2007a. The use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth surface processes and landforms* 32, 754-769.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Demoulin, A., 2007b. Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region. *Earth and Planetary Science Letters* 256, 588-603.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Dewitte, O., Demoulin, A., De Bo, H., Vanmaercke-Gottigny, M.C., 2007c. Reactivation of old landslides: lessons learned from a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Soil Use and Management* 23, 200-211. Vanmaercke-Gottigny, M.C., 1967. De

geomorfologische kaart van het Zwalmbekken. Verhandelingen van de Koninklijke Vlaamse Academie voor wetenschappen, letteren en schone kunsten van België – klasse der wetenschappen 99, pp. 93.

Vanmaercke-Gottigny, M.C., 1978. Regionale geomorfologische studie van het Zuid-Vlaamse heuvelland. K.U.Leuven, Fysische Aardrijkskunde, Onregelmatige. Paginanummering.

Vanmaercke-Gottigny, 1980. Landslides as a morphogenetic phenomenon in a hilly region of Flanders (Belgium), In; De Boodt, M., Gabriels, D. (Eds.), Assessment of erosion. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 475-484.

Vanneste D, 1999. Cursus : Ruimtelijke analysetechnieken. Instituut voor Sociale en Economische Geografie, KULeuven.

Kaarten

OC-GIS Vlaanderen, 2001. Geologische kaart van België, Vlaams gewest, kaartbladen 21 (Tielt), 22 (Gent), 29 (Kortrijk) en 30 (Geraardsbergen), schaal 1/50000. Ministerie van Economische zaken en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Ondersteunend Centrum GIS Vlaanderen, België, Gent.

OC-GIS Vlaanderen, 2001. Bodemkaart van het Vlaams Gewest, schaal 1/20000. Ondersteunend Centrum GIS Vlaanderen, België, Gent.

OC-GIS Vlaanderen, 2005. Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen, MVG-LIN-AMINAL-afdeling Water en MVG-LIN-AWZ-afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch onderzoek (GIS-Vlaanderen).

De Vos, W., Verniers, J., Herbosch, A., Vanguetaine, M., 1993. A new geological map of the Brabant Massif, Belgium. Geological Magazine, 130 (5): 606-611.

NGI, 1972. Topografische kaart van België, kaartbladen 21 (Tielt), 22 (Gent), 29 (Kortrijk) en 30 (Geraardsbergen), schaal 1/10000. National Geografisch Instituut, België, Brussel.