



# Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen

*Bestek: BOD/STUD/2007/02*

Eindrapport

Februari 2009

Stijn Van Kerckhoven, Michel Riksen en Wim Cornelis



# **Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen**

*Bestek: BOD/STUD/2007/02*

Eindrapport

Februari 2009

Stijn Van Kerckhoven, Michel Riksen en Wim Cornelis

**Opdrachtgever**

Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke rijkdommen

**Besteknummer**

BOD/STUD/2007/02

**Samenstelling Document**

Lic. Stijn Van Kerckhoven	UGent, België
Dr. Ir. Michel Riksen	Adviesbureau Dynamisch Landschap, Nederland
Prof. Dr. Ir. Wim Cornelis	UGent, België

**Wijze van refereren**

Van Kerckhoven, S., Riksen, M., Cornelis W.M. (2009). Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen. Eindrapport, Universiteit Gent, Vakgroep Bodembeheer, 79p.

# Inhoudstafel

1. Literatuurstudie.....	1
1.1. Winderosie binnen het geheel van bodemerosie .....	3
1.2. Winderosie in Vlaanderen .....	3
1.3. Beschrijving van het winderosieproces.....	5
1.3.1. Deflatie.....	5
1.3.2. Transport.....	6
1.3.2.1. Saltatie (Saltation) .....	7
1.3.2.2. Kruip (Creep).....	8
1.3.2.3. Suspensie.....	8
1.3.3. Depositie .....	9
1.4. Factoren die het winderosieproces beïnvloeden.....	9
1.4.1. Erosiviteit .....	10
1.4.1.1. Meteorologische condities .....	10
1.4.1.2. Oppervlakteruwheid.....	12
1.4.1.3. Veldlengte .....	12
1.4.1.4. Reliëf .....	13
1.4.2. Erodibiliteit .....	13
1.4.2.1. Deeltjesgrootte en deeltjesgrootteverdeling .....	14
1.4.2.2. Aggregaatsgrootte .....	15
1.4.2.3. Organisch materiaal en oplosbare zouten.....	16
1.4.2.4. Vochtgehalte van het bodemoppervlak .....	16
1.5. Gevolgen van winderosieprocessen.....	16
1.5.1. On-site effecten.....	17
1.5.1.1. Bodemdegradatie .....	17
1.5.1.2. Landbouwkundige schade .....	18
1.5.2. Off-site effecten.....	18
1.5.2.1. Ecologische effecten.....	18
1.5.2.2. Gezondheidseffecten.....	19
1.5.2.3. Materiële schade .....	19
1.6. Maatregelen tegen winderosie .....	20
1.6.1. Reductie van de windsnelheid nabij het bodemoppervlak.....	20
1.6.2. Toename van de bodemstabiliteit en ruwheid.....	21
1.6.3. Bodembedekking .....	22
1.6.4. Risico op schade aan gewassen beperken .....	23
2. Selectie van het geschikte winderosiemodel voor Vlaanderen.....	24
2.1. Randvoorwaarden voor een geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen .....	24
2.2. Keuze van een geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen.....	25

2.2.1. Wind Erosion Equation (WEQ) .....	25
2.2.2. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) .....	26
2.2.3. Wind Erosion Prediction System (WEPS).....	28
2.2.4. Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC).....	29
2.2.5. Texas Tech Wind Erosion Analysis Model (TEAM) .....	29
2.2.6. Wind Erosion Assessment Model (WEAM).....	30
2.2.7. Wind Erosion on European Light Soils (WEELS).....	31
2.2.8. WEQ als geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen.....	32
3. Modelleren van het winderosierisico in Vlaanderen .....	33
3.1. Bepaling van de WEQ-factoren voor Vlaanderen .....	33
3.1.1. De bodemerodibiliteitsindex I .....	33
3.1.1.1. De I.C.E.-windtunnel.....	36
3.1.1.2. De balansmethode in de windtunnel .....	38
3.1.1.3. Bepaling van de bodemerodibiliteitsindex I .....	40
3.1.1.4. Toetsing van de berekende erodibiliteitsindexen .....	41
3.1.1.5. Cartografische voorstelling van de bodemerodibiliteitsindex .....	43
3.1.2. Rugruwheidsfactor K.....	44
3.1.3. Klimaatfactor C.....	47
3.1.3.1. Bepaling van de klimaatsfactor C.....	47
3.1.3.2. Cartografische voorstelling van de klimaatsfactor van Vlaanderen.....	48
3.1.4. Veldlengte L .....	52
3.1.5. Vegetatiefactor V.....	54
3.1.5.1. Bepaling van de Vegetatiefactor V .....	54
3.1.6. De formules van WEQ.....	57
3.2. Opstellen van risicokaart voor winderosie in Vlaanderen.....	58
3.2.1. De potentiële erosierisicokaart voor winderosie in Vlaanderen .....	58
3.2.2. De actuele erosierisicokaart voor winderosie in Vlaanderen .....	60
3.3. Validatie van de risicokaart voor winderosie in Vlaanderen .....	61
3.4. Kanttekeningen model.....	62
3.5. Gevoeligheidsanalyse .....	64
4. Besluit .....	66
5. Referenties .....	67
6. Appendix .....	75
6.1. Lijst met afkortingen .....	75
6.2. Interview landbouwers over stuifgevoelige landbouwgronden in Vlaanderen ...	77

# 1 Inleiding

Het bodembeschermingsbeleid in Vlaanderen besteedt recent bijzondere aandacht aan erosiebestrijding. Mede op basis van een gebiedsdekkende erosiekaart (Van Rompaey et al., 2000) worden erosiebestrijdingsmaatregelen financieel ondersteund vanuit de Vlaamse overheid. Het beleid richt zich echter uitsluitend op erosie door water. Aan erosie door wind wordt weinig aandacht besteed, mede omdat de gevolgen minder zichtbaar zijn, en omdat wordt aangenomen dat gelet op het gematigd zeeklimaat in Vlaanderen, de aangetaste oppervlakte beperkt is.

Relicten van stuifzandgebieden die verspreid over Vlaanderen voorkomen, herinneren er ons echter aan dat winderosie bij verkeerd landgebruik een groot probleem kan vormen. Ook op heden mag winderosie in Vlaanderen niet onderschat worden. Het opstellen van een actuele winderosierisicokaart, dat wordt voorafgegaan door een gedegen literatuuronderzoek en de exploratie van geschikte simulatiemodellen dringt zich dan ook op. De Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen gaf de Vakgroep Bodembeheer, Universiteit Gent, de opdracht een studie omtrent de afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen uit te voeren.

De doelstelling van de studie is drieledig en omvat:

1. een literatuurstudie rond de voor Vlaanderen relevante winderosieprocessen, de mogelijke gevolgen van winderosie, inventarisatie van risicovolle landgebruiksystemen en landbouwpraktijken, en mogelijke maatregelen om winderosie te beperken;
2. het vergelijken van diverse winderosiemodellen, het nagaan van hun toepasbaarheid voor Vlaanderen en de uiteindelijke selectie van een berekeningsmodel;
3. het opstellen van een winderosierisicokaart voor Vlaanderen met aandacht voor de betrouwbaarheid en variabiliteit van de resultaten.

Deze drie doelstellingen worden uitgewerkt in de respectievelijke hoofdstukken 2, 3 en 4 van dit document. In hoofdstuk 5 worden de besluiten getrokken.



## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Winderosie binnen het geheel van bodemerosie

Bodemerosie is het losmaken, het verplaatsen en het afzetten van bodemdeeltjes door een bewegend agens. Dit agens is in de meeste gevallen water (watererosie) of wind (winderosie). Naast deze erosieprocessen bestaan er ook nog andere processen die zorgen voor de verplaatsing van bodemmateriaal, met name massatransport, het bewerken van akkers en de export van bodemmateriaal bij het rooien van gewassen (Poesen en Govers, 1994).

Klik (2004) voorspelde aan de hand van de Wind Erosion eQuation (WEQ) voor een gebied in het noordoosten van Oostenrijk een winderosiewaarde van 0 tot 5,4 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, met een gemiddelde van 2,4 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. In de meer winderosiegevoelige Great Plains in Amerika is er volgens Batie (1983) een gemiddeld bodemverlies door wind van 12 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>.

In Vlaanderen is de erosieproblematiek een actueel thema. Tot op heden werd vooral aandacht besteed aan erosie door water. Erosie door wind mag echter niet verwaarloosd worden, vermits Vlaanderen voor tweederde bestaat uit lage, vlakke, relatief open streken waarvan de bovengrond is opgebouwd uit pleistocene of holocene zanden. Vooral de bodems in de Limburgse en Antwerpse Kempen, en in de Vlaamse zandstreek zijn gevoelig aan winderosie (Poesen et al., 1996). Vaak is dit verschijnsel van lokale en/of tijdelijke aard of blijft de geleden schade beperkt. Hierdoor wordt winderosie slechts zelden gerapporteerd en krijgt men de indruk dat het verschijnsel in Vlaanderen onbelangrijk is. Niettemin is winderosie op verschillende plaatsen in Vlaanderen een niet te onderschatten probleem (Poesen et al., 1996).

### 2.2 Winderosie in Vlaanderen

Op het einde van de jaren '70 en in het begin van de jaren '80 werd aan het Laboratorium voor Experimentele Geomorfologie van de K.U.Leuven onderzoek verricht naar de verschillende bodemdegradatieprocessen in Vlaanderen. Dit onderzoek gebeurde aan de hand van

talrijke enquêtes die gehouden werden onder Vlaamse landbouwers. Uit deze enquêtes bleek o.a. dat winderosie op akkers overal in Vlaanderen voorkomt (Poesen et al., 1996).

Het probleem bleek het meest uitgesproken te zijn in de Antwerpse en de Limburgse Kempen, waar vooral in het voorjaar de droge zandgronden het gevoeligst zijn. Gedurende deze periode liggen de velden nog braak of zijn ze pas ingezaaid (Poesen et al., 1996). Vandebek (1986), die in 11 gemeenten in het noorden van de provincie Limburg landbouwers ondervroeg, meldde dat twee op drie ondervraagde landbouwers met winderosie op hun akker geconfronteerd werden. Bij één op drie landbouwers ging het zelfs om een fenomeen dat jaarlijks terugkeerde.

In West- en Oost-Vlaanderen is winderosie van landbouwgronden een minder groot probleem. Toch werden ook in deze streken gevallen van belangrijke winderosie gemeld: ten oosten van Waregem (De Meester, 1982), Langemark (Parrein, 1980) en Loker (Lamond, 1978).

In Vlaams-Brabant zijn het vooral de percelen die bestaan uit zandige gronden met een slechte of afwezige kruimelstructuur die gevoelig zijn voor winderosie (Volkaerts, 1980). De Vry (1980) stelde in een studie in de omgeving van het Vlaams-Brabantse Wakkerzeel echter vast dat verstuiving op alle types bodems in deze streek voorkomt, behalve op zeer zware gronden (klei en zware klei). Zelfs slecht gedraineerde leemgronden kunnen verstuiven.

Winderosie kan in Vlaanderen naast akkerland ook nog in de kuststreek en op de inlandse stuifzanden optreden. Studies door Denolf (1979), Dehoorne (1983) en Plasschaert (1985) hebben aangetoond dat op deze plaatsen winderosie niet te verwaarlozen is. In Vlaanderen komen de meeste stuifzanden voor in de Antwerpse en Limburgse Kempen. Ze zijn ontstaan door het plaatselijk herverstuiven van dekzanden die ongeveer 10 000 à 15 000 jaar geleden door de wind zijn afgezet. Ook vandaag treedt er op deze plaatsen nog zandtransport op. Dit gebeurt vooral tijdens de herfst en de winter en niet zozeer tijdens het voorjaar zoals bij akkererosie het geval is. Dit omdat de stuifzanden minder afhankelijk zijn van de neerslag door hun hogere infiltratiecapaciteit. Hierdoor zal winderosie op stuifzanden vooral voorkomen in de periode met de hoogste windsnelheden (herfst en winter) (Chepil, 1954). Erosie op de stuifzanden zal lager liggen dan aan de kustduinen, omdat aan de kust zowel de windsnelheid als het aantal verstuivingsuren hoger liggen (Poesen et al., 1996).

Gronden kunnen ook winderosiegevoelig worden door verontreiniging met zware metalen. Zware metalen in de bodem kunnen er met name voor zorgen dat de vegetatieve bedekking vermindert of verdwijnt, waardoor zijn stuifgevoeligheid toeneemt. Dit is vooral het geval in de Noorderkempen, meer bepaald de omgeving van Lommel, Balen en Overpelt. In het verleden hebben in deze streek gevestigde zinkbedrijven aanzienlijke hoeveelheden zware metalen in de omgeving verspreid (Poesen et al., 1996).

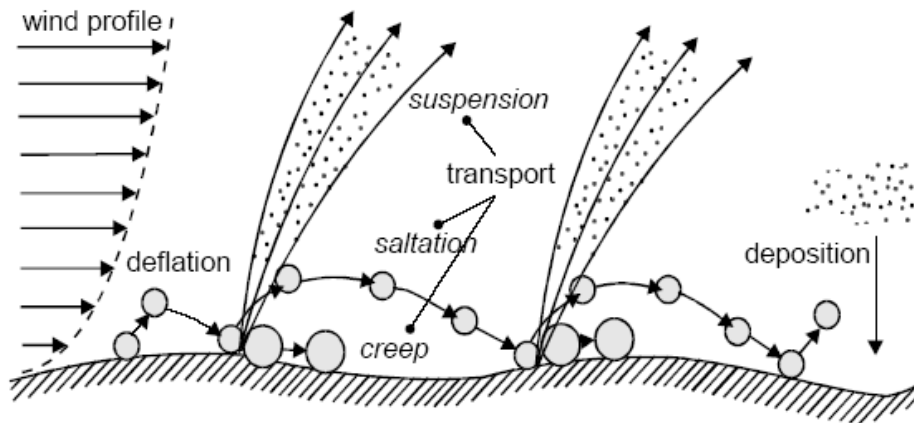
Tot slot kan ook het gebruik van groot materiaal (tanks) op militaire domeinen (bijvoorbeeld regio Hechtel en Leopoldsburg) bijdragen tot een verhoogde winderosiegevoeligheid. Het gebruik van dergelijk materiaal kan namelijk de bodemstructuur en de vegetatie zwaar beschadigen (Poesen et al., 1996).

## **2.3 Beschrijving van het winderosieproces**

Winderosie is een fysisch proces waarbij sediment door de wind wordt meegenomen en over een bepaalde afstand getransporteerd. Hierbij kunnen drie deelprocessen worden onderscheiden (Figuur 1), die elk door verschillende fysische mechanismen worden gecontroleerd: deflatie, transport, depositie (Shao, 2000).

### **2.3.1 Deflatie**

Deflatie is het losmaken en het opnemen van bodemdeeltjes door de wind. Deflatie kan pas starten wanneer de wind een kritische snelheid bereikt. Bij deze kritische windsnelheid zijn de aerodynamische (destabiliserende) krachten groter dan de krachten die de deeltjes bij elkaar aan het bodemoppervlak houden (Cornelis en Gabriels, 2004). De hoeveelheid bodemdeeltjes die door de wind in beweging wordt gezet, is vooral afhankelijk van meteorologische eigenschappen, waarvan de windsnelheid de voornaamste is, en statische en dynamische bodemeigenschappen (Cornelis, 2007). Eens het wind-erosieproces van start is gegaan, zullen bodemdeeltjes ook in beweging komen door de impactkrachten veroorzaakt door neerdalende bodemdeeltjes die inslaan op het bodemoppervlak (Cornelis et al., 2004b).



**Figuur 1.** Schematische voorstelling van de winderosiedeelprocessen (Cornelis, 2007)

Windtunnelexperimenten van Cornelis et al. (2004b,c) tonen aan dat deflatie zal optreden wanneer de toplaag van de bodem voldoende droog is. Het is dan ook te verwachten dat bij neergslagevents, de toplaag te vochtig zal zijn om deflatie te laten plaatsnemen. Toch kan er op duinen en stranden deflatie optreden gedurende een regenbui. De korrels komen namelijk los van het oppervlak door de impact van de regendruppels (Cornelis et al., 2004d,e). De wind zorgt in deze omstandigheden niet voor deflatie, maar heeft een loutere transportfunctie.

Het losmaken van bodemdeeltjes wordt echter niet enkel veroorzaakt door de wind, neerdalende bodemdeeltjes of regen. Ook bodembewerkingen en oogstactiviteiten dragen, zeker voor een regio als Vlaanderen, in sterke mate bij tot het verstuiven van bodemdeeltjes (Bogman et al., 2006). Bij bodembewerking komen onder droge condities fijne bodemdeeltjes los, die vervolgens door de wind van het veld afgevoerd worden (Figuur 2). Ook kunnen bodembewerkingen en oogstactiviteiten stabiele bodemoppervlakten verstoren en zo meer gevoelig maken aan winderosie.

### 2.3.2 Transport

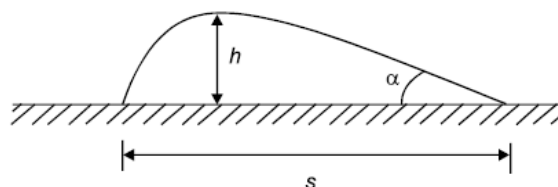
De term transport slaat op het verplaatsen van bodemdeeltjes met de wind. Dit transport kan naargelang de korreldiameter (Bagnold, 1941) en de atmosferische stroomcondities (Shao et al., 1996) op drie verschillende manieren gebeuren (Figuur 1): kruip, saltatie en suspensie.



**Figuur 2.** Deflatie ten gevolge van aardappeloogst op 10 oktober 2005 te Etikhove (Rollé, 2006)

### 2.3.2.1 Saltatie

Saltatie is de sprongwijze, windafwaartse beweging van bodemdeeltjes met een diameter van ongeveer 60 tot 1000  $\mu\text{m}$ . Het is het initiële type van transport van bodemdeeltjes nadat ze van de grond zijn losgekomen. Het traject van een salterende korrel is weergegeven in Figuur 3. De baan van de korrel wordt gekarakteriseerd door een initiële steile opwaartse beweging, met een typische opstijginghoek van ongeveer  $55^\circ$  (Shao, 2000). Als gevolg van de hoge snelheidsgradiënt nabij het oppervlak, zal de korrel over een korte afstand zijn maximale hoogte  $h$  bereiken. Vervolgens zal de korrel geleidelijk aan beginnen te vallen, ten gevolge van de gravitationele valversnelling en de versnelling veroorzaakt door de wind. De val beschrijft ongeveer een rechte lijn en maakt ongeveer een hoek  $\alpha = 6^\circ - 12^\circ$  (naargelang de grootte van de korreldiameter) met de horizontale. De totale afstand  $s$  die een salterende korrel kan afleggen is 12 tot 15 keer de maximale hoogte  $h$  (Cooke et al., 1993).



**Figuur 3.** Traject van een salterende korrel

Niettegenstaande het saltatieproces zich vooral beperkt tot korte afstanden in de onderste meter van de atmosfeer, is het voor de meeste bodems de belangrijkste vorm van transport bij het winderosieproces (50 tot 70 %) (Cornelis, 2007).

De energie die ontstaat bij de impact van een salterende korrel wordt gebruikt voor:

- *terugkaatsing* van één enkele korrel (vaak de impactkorrel zelf) van het oppervlak met een hoge energie (60% van de energie die door de impact werd geproduceerd).
- *opspringen*, met een veel lagere energie, van een aantal andere korrels ( $\pm 10$ ) van het oppervlak; de totale energie van alle geëjecteerde korrels vertegenwoordigt ongeveer 1% van de totale impactenergie.
- *deformatie* en herschikking van korrels op het oppervlak ( $\pm 40$  % van de impactenergie).

Sommige auteurs beschouwen het ejecteren van korrels als een vierde vorm van transport, namelijk *reptatie* (Anderson and Haff, 1998; Cooke et al., 1993).

Een speciale vorm van saltatie is *regenspatsaltatie* (Warburton, 2003; Cornelis et al. 2004d,e). Dit is het proces waarbij de impact van regendruppels bodemdeeltjes doet opspatten, waarna de opgespatte deeltjes door de wind worden meegevoerd.

#### 2.3.2.2 Kruip

De grootste bodemdeeltjes (diameter > 500  $\mu\text{m}$ ) kunnen bij lagere windsnelheden alleen maar rollend of schuivend over het aardoppervlak worden verplaatst. Ze worden dus niet opgetild. Deze deeltjes worden in beweging gebracht door de impact van salterende deeltjes. Deze vorm van transport over de grond wordt kruip genoemd en neemt ongeveer 5 tot 25% van het totale transport door winderosie voor zijn rekening (Chepil, 1945).

#### 2.3.2.3 Suspensie

Suspensie is de transportvorm van het fijnste bodemmateriaal (diameter < 70  $\mu\text{m}$ ). Door de impact van salterende bodemdeeltjes kan dit fijne materiaal in de lucht terecht komen en in suspensie gaan. Shao (2000) rapporteerde dat deze kleine deeltjes op twee manieren in suspensie kunnen gaan: lange- en korte-termijnsuspensie. De zeer kleine deeltjes (diameter < 20  $\mu\text{m}$ ) kunnen een lange tijd (tot enkele dagen) in suspensie blijven en zo een zeer grote afstand afleggen (enkele honderden kilometers). De deeltjes met een diameter tussen 20

µm en 70 µm blijven een kortere tijd (enkele uren) in suspensie en leggen daardoor ook minder afstand af.

Het transport van zeer kleine deeltjes in suspensie heeft een grote invloed op de luchtkwaliteit. De kleinste deeltjes met een diameter < 10 µm (PM10) kunnen ingeademd worden en oefenen zo een negatief effect op de gezondheid van de mens uit.

### 2.3.3 Depositie

Depositie is het afzetten van het geërodeerde materiaal. De intensiteit van depositie kan gekwantificeerd worden door de sedimentatieflux  $F_s$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en wordt gedefinieerd als de totale massa sediment  $M$  (kg) dat afgezet wordt op een oppervlakte  $S$  ( $\text{m}^2$ ) per tijdseenheid  $t$  (s):

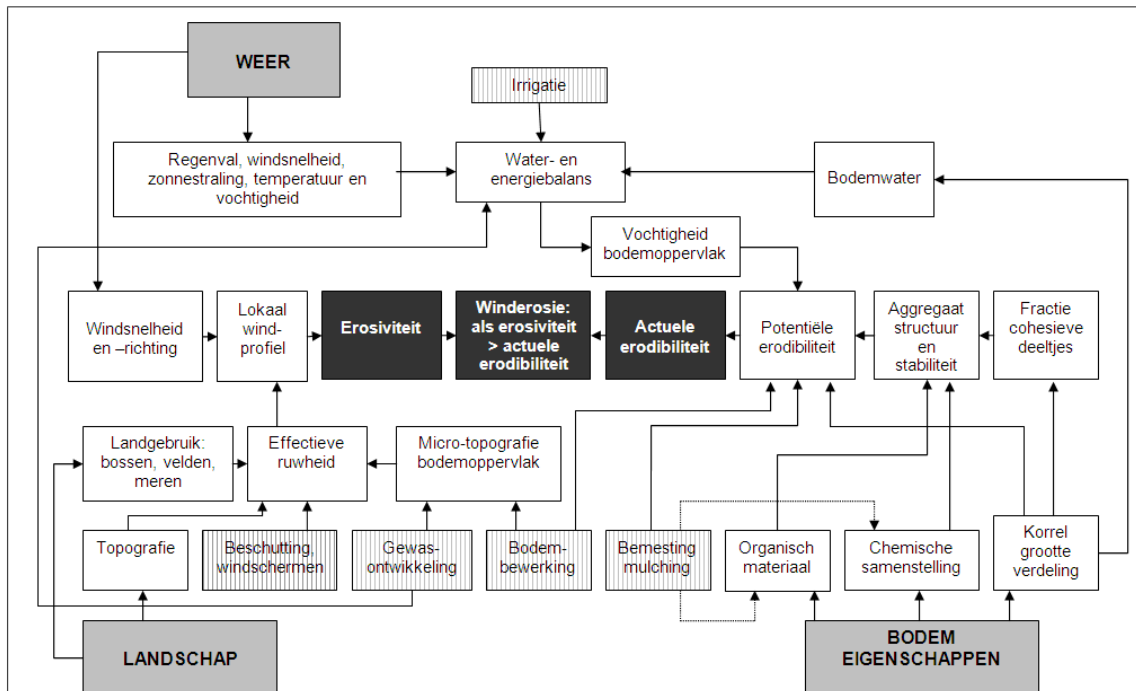
$$F_S = \frac{M}{S t} \quad (1)$$

Depositie kan op twee verschillende manieren gebeuren, droog en nat (Shao, 2000). Bij droge depositie wordt het getransporteerde materiaal afgezet bij afnemende windsnelheid of bij het voorkomen van vegetatie, water of andere obstakels. Wanneer de windsnelheid afneemt, worden eerst de grote korrels afgezet, terwijl de fijnere korrels verder getransporteerd worden. Bij natte depositie worden de in suspensie verkerende bodemdeeltjes door de neerslag uit de lucht gespoeld.

## 2.4 Factoren die het winderosieproces beïnvloeden

Winderosie treedt vooral op in streken waar aan de volgende vier condities voldaan is: voldoende hoge windsnelheid, een weinig of niet ontwikkeld vegetatiedek, een beperkte neerslaghoeveelheid en een bodem die uit losse en voldoende fijne korrels bestaat (Poesen et al., 1996). De voorwaarden voor winderosie kunnen opgesplitst worden in twee categorieën: de erosiviteit, of de erosiecapaciteit van wind en de erodibiliteit, of de weerstand van de bodem tegen de wind. De factoren die de erosiviteit en de erodibiliteit controleren zijn een mengeling van zowel natuurlijke factoren als menselijke activiteiten. Een schematische voorstelling is weergegeven in Figuur 4. Drie groepen van factoren, met name meteorologische factoren, statische en dynamische bodemeigenschappen, en landschapkenmerken

worden voorgesteld door grijze kaders. De managementpraktijken van de landbouwer, een vierde groep van factoren, herkent men aan de kaders met verticale grijze lijnen. Het middelpunt van de figuur geeft de relatie weer tussen de erosiviteit en de actuele erodibiliteit van het bodemoppervlak (donkergrijze kaders met witte letters).



**Figuur 4.** Schematisch overzicht van de beïnvloedende factoren van erosiviteit en erodibiliteit (Warren and Barring, 2003)

## 2.4.1 Erosiviteit

Erosiviteit is de eroderende capaciteit van wind of een maat voor de sleep- of schuifspanning veroorzaakt door wind (Cornelis, 2005). Sleepspanning is de kracht die de wind uitoefent op een bodemoppervlak parallel aan dat oppervlak en wordt dus uitgedrukt in  $N\ m^{-2}$ . Deze varieert naargelang de meteorologische condities, de oppervlakteruwheid, de veldlengte en het reliëf.

### 2.4.1.1 Meteorologische condities

**Sleepspanning.** De erosiviteit van de wind wordt in de meeste gevallen uitgedrukt in termen van sleepsnelheid  $u_s$ , die een maat is voor de sleepspanning veroorzaakt door de wind aan



het bodemoppervlak (Cornelis, 2005). De sleepsnelheid is een cruciale factor voor het bepalen van waar, wanneer en met welke intensiteit winderosie optreedt. Opdat winderosie kan optreden moet de windsnelheid een drempelwaarde, de kritische sleepsnelheid ( $u_{*c}$ ), overschrijden. De sleepsnelheid en dus ook de kritische sleepsnelheid zijn afhankelijk van de atmosferische condities en de bodemeigenschappen (Cornelis en Gabriëls, 2004; Cornelis et al., 2004b). Blijft de windsnelheid, na het bereiken van deze drempelwaarde nog stijgen, dan worden alsmaar meer deeltjes in transport meegenomen totdat een maximale waarde bereikt wordt. Zolang de lucht nog energie beschikbaar heeft, vindt er dus erosie plaats. Wanneer de maximale transportcapaciteit van de wind bereikt wordt, treedt een toestand van stationaire erosie op, waar de deflatie gelijk is aan de depositie. Op plaatsen waar de windenergie afneemt, vindt depositie plaats.

**Windsnelheid.** Omdat de sleepsnelheid niet steeds gekend is, wordt er in voorspellingsmodellen ook gebruik gemaakt van de windsnelheid op een zekere hoogte. Dit is aanvaardbaar omdat er een lineair verband bestaat tussen de sleepsnelheid en de windsnelheid op een bepaalde hoogte. Dit verband wordt gegeven door de wet van Prandtl-von Kármán (1935):

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

met  $u$  de windsnelheid op hoogte  $z$  ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $u_*$  de sleepsnelheid ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $z$  de hoogte (m),  $\kappa$  de von Kármán-constante (0,41), en  $z_0$  de ruwheidslengte van het oppervlak (m).

**Turbulentie-intensiteit.** Naast de windsnelheid is ook de turbulentie-intensiteit een belangrijke beïnvloedende factor. Deze doet namelijk de bodemdeeltjes trillen, waardoor ze gemakkelijker door de wind kunnen opgenomen worden (Bisal and Nielsen, 1962).

**Relatieve luchtvochtigheid.** Over het effect van de relatieve luchtvochtigheid op winderosie zijn er verscheidene meningen. Sommige onderzoekers vinden geen duidelijke relatie tussen de relatieve luchtvochtigheid en de hoeveelheid winderosie. Belly (1964) echter meent dat de kritische sleepsnelheid in een vochtige lucht met 50% toeneemt ten opzichte van droge luchtomstandigheden. Andere onderzoekers, zoals Neuman (2003) menen dat de relatieve vochtigheid eerder de bodemerodibiliteit beïnvloedt door middel van hun impact op het bodemvochtgehalte (zie paragraaf 2.4.2.4).

**Neerslag en evaporatie.** Neerslag en evaporatie beïnvloeden in de eerste plaats het bodemvochtgehalte en zijn zo verbonden met de erodibiliteit van een bodem (zie paragraaf 2.4.2.4). De erosiviteit van regen, uitgedrukt in termen van kinetische energie of het moment van regendruppels en/of regenvalintensiteit, wordt vaak niet in rekening gebracht bij studies rond winderosie. Terreinwaarnemingen hebben echter aangetoond dat er ook gedurende neerslagevents sedimenttransport kan plaatsvinden (regenspatsaltatie, zie paragraaf 2.3.2.1).

#### 2.4.1.2 Oppervlakteruwheid

Wind wordt door het bodemoppervlak afgeremd. Hoe hoger de oppervlakteruwheid, hoe meer de wind wordt afgeremd. Deze ruwheid is een functie van de bodemeigenschappen, de teelttechniek en de bodembedekking. De ruwheid van de naakte, onbedekte en onbewerkte bodem wordt enkel bepaald door de bodemeigenschappen: de deeltjesgrootteverdeling en de aggregatie. Extra ruwheid kan ontstaan door vegetatieve bedekking en is afhankelijk van de hoogte en de dichtheid van het gewas. Gewassen die jaarlijks gezaaid worden, zorgen niet het hele jaar door voor protectie. Naast de zaaidatum is ook de groeisnelheid een fundamentele factor. Gewasresten die op het veld achterblijven, bieden eveneens een belangrijke beschermende functie. Verschillende teelttechnieken creëren een verschillende ruwheid en maken zo de bodems al dan niet gevoeliger aan winderosie. Naar analogie met het contourploegen bij watererosie, waarbij best loodrecht op de helling wordt gewerkt, wordt om winderosie te beperken best loodrecht op de dominante windrichting gewerkt (Zobeck et al., 2003).

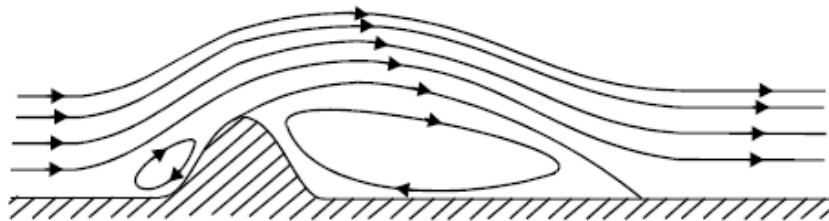
#### 2.4.1.3 Veldlengte

De veldlengte is de werkelijke onbeschutte lengte van het veld langs de overheersende windrichting (Woodruff and Siddoway, 1965). De windafwaartse afstand nodig opdat de wind 63,2% van zijn transportcapaciteit zou bereiken, wordt de kritische veldlengte genoemd. Deze kritische veldlengte is afhankelijk van de windsnelheid en de bodemsamenstelling. Ze is wel kleiner dan 150 m voor de meeste oppervlakten en bodems. De kennis van de kritische veldlengte is een belangrijk gegeven om tot een effectieve winderosiecontrole te komen. Bij afname van de veldlengte kan immers winderosie gereduceerd worden (Warren and Barring, 2003). In het verleden nam door schaalvergroting van de landbouw de per-

ceelsoppervlakte toe, met als gevolg een grotere veldlengte en dus een hogere erosiegevoeligheid.

#### 2.4.1.4 Reliëf

Het reliëf heeft zowel een rechtstreekse als een onrechtstreekse invloed op winderosie. De topografie beïnvloedt rechtstreeks het windpatroon nabij het aardoppervlak, en heeft daarom een significante impact op de aërodynamische krachten die op de bodemdeeltjes inwerken. Aan de windopwaartse zijde van een helling neemt de wind initieel zeer geleidelijk af, maar verhoogt dan richting de top. De hoogste windsnelheden worden waargenomen op en juist na de top, waar de stroomlijnen in hoge mate convergeren. Windafwaarts van de top verwijderd de luchtstroom zich van het heuveloppervlak, waardoor er een zone van omgekeerde stroom boven de lijzijde van de heuvel ontstaat. Verder windafwaarts van de heuvel maakt de luchtstroom terug contact met het oppervlak (Figuur 5). De invloed van de heuvel op het stroomlijnenpatroon blijft windafwaarts tot een grote afstand van de heuvel merkbaar (Goossens, 1992).



**Figuur 5.** Stroomlijnen in de buurt van een heuvel (naar Goossens, 1987)

Buiten het rechtstreeks beïnvloeden van de stroomlijnen, speelt reliëf ook een onrechtstreekse rol bij winderosie. Het reliëf heeft namelijk een impact op talrijke factoren die winderosie beïnvloeden, zoals bodemvochtigheid, vegetatiegroei, enz.

#### 2.4.2 Erodibiliteit

De erodibiliteit is de gevoeligheid van de bodem voor winderosie of zijn weerstand ertegen. Als maat voor de bodemerodibiliteit wordt vaak de kritische sleepsnelheid gebruikt (Cornelis,

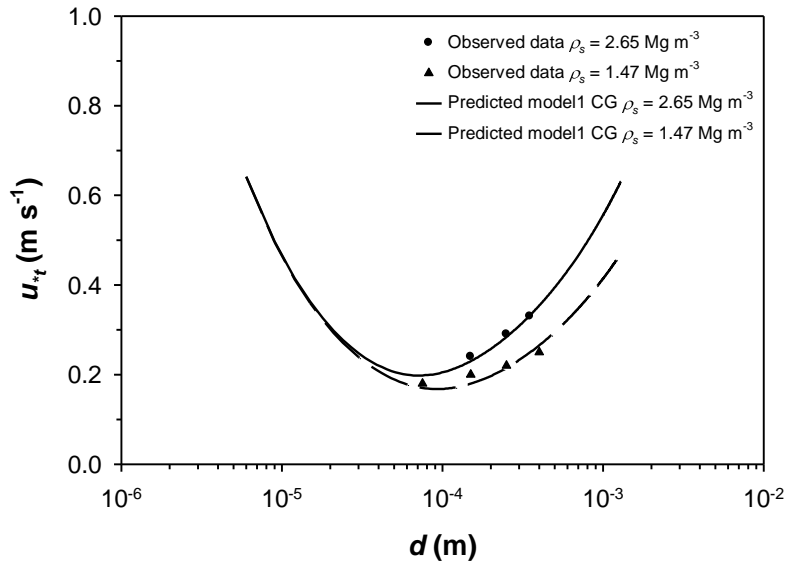
2005). Deze hangt vooral af van de korrelgrootte en korrelgrootteverdeling, de aggregaatsstabiliteit, het gehalte organisch materiaal en de vochtigheid van het bodemoppervlak.

#### 2.4.2.1 Deeltjesgrootte en deeltjesgrootteverdeling

Bodemdeeltjes met een diameter tussen 80 en 100  $\mu\text{m}$  zijn het meest stuifgevoelig. Zowel bij afnemende als bij toenemende diameter ten opzichte van deze optimale diameter zal een grotere windkracht vereist zijn vooraleer deflatie en transport optreedt. De reden hiervoor is dat met een kleiner wordende korreldiameter het effect van cohesiekrachten zoals van der Waalskrachten en elektrostatische ladingen tussen de korrels onderling toeneemt t.o.v. het effect te wijten aan hun korrelgewicht (Cornelis en Gabriels, 2004). Volgens Bagnold (1941) is dit effect bovendien te wijten aan de meer gelijkmatige verdeling van de wrijvingskracht over verschillende kleine bodempartikels. Naarmate de deeltjesgrootte toeneemt, werkt de wrijvingskracht meer in op individuele basis. Cornelis en Gabriels (2004) toonden echter aan dat dit laatste aerodynamisch effect op aarde te verwaarlozen is. Bij deeltjes met een diameter groter dan 100  $\mu\text{m}$  wordt het gewicht de bepalende factor. Cohesie en gewicht zorgen ervoor dat  $u_{*t}$  zal stijgen bij respectievelijk afnemende en toenemende diameter (t.o.v. van een diameter tussen 80 en 100  $\mu\text{m}$ ) en dus dat de kans op deflatie en transport zal minderen.

Figuur 6 toont de kritische sleepsnelheid in functie van de deeltjesgrootte voor zandkorrels en bodemaggregaten. Gezien kleideeltjes relatief gemakkelijk samenklitten en microaggregaten (5-500  $\mu\text{m}$ ) vormen, vertonen kleiige bodems vaak een lagere kritische sleepsnelheid dan leembodems, of kunnen ze met andere woorden gevoeliger zijn aan winderosie dan lemige bodems. Chepil (1954) stelde vast dat kleiige bodems vaak even winderosiegevoelig waren als eerder lichte zandleembodems. De winderosiegevoeligheid van kleiige bodems hing echter veel sterker af van de bodemvochtcondities bij lichte zandleem- en zandbodems. Globaal gezien vertoonden lemige bodems de laagste winderosiegevoeligheid.

Naast de grootte van de bodemdeeltjes is ook de deeltjesgrootteverdeling van groot belang. Zo zal bijvoorbeeld een lemige bodem die enkel bestaat uit fijn materiaal veel resistenter zijn tegen winderosie dan een analoge bodem gemengd met wat grover materiaal (Chepil and Woodruff, 1963).



**Figuur 6.** Kritische sleepsnelheid in functie van deeltjesgrootte voor zandkorrels (met een partikeldichtheid  $\rho_s$  van  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ ) en voor bodemaggregaten (met een dichtheid van de aggregaten  $\rho_s$  van  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ ) (Cornelis en Gabriels, 2004)

#### 2.4.2.2 Aggregaatsgrootte

Chepil (1942) vond op basis van windtunnelproeven bij verschillende windsnelheden dat aggregaten groter dan 0,84 mm niet eroderen onder invloed van wind. Sindsdien wordt het percentage aggregaten kleiner dan 0,84 mm vaak gebruikt als maat voor de erodibiliteit van een bodem voor wind. Dit percentage wordt ook wel de erodibiliteitsfractie genoemd. Indien een bodem een kleine erodibiliteitsfractie heeft, dus veel aggregaten groter dan 0,84 mm, zal maar een beperkt gedeelte van deze bodem gevoelig zijn voor erosie.

De aggregaten kunnen echter zelf ook verbroken worden onder invloed van bodembewerking, de impact van regendruppels en door abrasie van een met sediment beladen luchtstroom (Hagen, 1991). Hierdoor kan de erodibiliteitsfractie vergroten en de bodem winderosiegevoeliger worden. Dit zal minder snel gebeuren indien de aggregaten stabiel zijn.

Chepil (1950) toonde aan dat, voor een zelfde percentage aggregaten groter dan 0,84 mm, vele kleinere aggregaten het bodemoppervlak beter “beschermen” dan een beperkter aantal grotere aggregaten.

#### 2.4.2.3 Organisch materiaal en oplosbare zouten

De aanwezigheid van oplosbare zouten kan significant de kritische sleepsnelheid doen stijgen wanneer ze cementachtige verbindingen mogelijk maken tussen individuele bodemkorrels. Deze verbindingen tussen de deeltjes zullen voor een verlaging van de toevoer van korrels aan de luchtstroom zorgen. Hierdoor zal de hoeveelheid van sediment in transport afnemen (Nickling, 1984). Organisch materiaal zorgt voor een toename van de bindingskrachten tussen individuele bodemdeeltjes (de Vos, 1996). Dit leidt echter niet altijd tot een afname van de winderosiegevoeligheid. Zoals eerder gezegd kan vorming van microaggregaten net in een verhoogde gevoeligheid aan winderosie resulteren. Naarmate het percentage aan grotere aggregaten (vooral de fractie groter dan 0,84 mm) toeneemt, zal de bodem evenwel minder stuifgevoelig zijn.

#### 2.4.2.4 Vochtgehalte van het bodemoppervlak

Naarmate het vochtgehalte van het bodemoppervlak toeneemt, zal vooral deflatie en in mindere mate ook transport van de bodemdeeltjes afnemen (Chepil, 1956; Cornelis et al., 2003, 2004b,c). Op een met water verzadigd oppervlak vindt alleen nog depositie plaats. Zodra door sedimentatie het oppervlak niet langer verzadigd is, kan er opnieuw deflatie optreden.

Zoals al eerder aangegeven en nu ook blijkt uit de vele factoren en onderlinge interacties (pijlen) in Figuur 4, is het hele winderosieproces een complex gegeven. Bovendien vertonen deze factoren ook nog eens een hoge mate van variatie in ruimte en tijd. Bijgevolg is het niet alleen moeilijk winderosie te meten, maar is het nog moeilijker winderosie goed te voorspellen. Het is vandaar meer aangewezen om de risico's in kaart te brengen en niet zo zeer erosie in absolute cijfers te voorspellen.

### 2.5 Gevolgen van winderosieprocessen

De meeste erosieschade komt voor wanneer de bodems een vegetatieve bedekkinggraad hebben van 0 tot 30% hebben (Riksen en De Graaff, 2001). De gevolgen van winderosie laten zich zowel on- als off-site voelen (Goossens, 2003):

- **On-site effecten** komen voor op het windgeërodeerde landbouvveld of op een aangrenzend veld. De on-site effecten kunnen op hun beurt ingedeeld worden in bodemdegradatie en landbouwkundige schade.
- **Off-site effecten** komen op grotere afstanden van de geërodeerde velden voor. Hiertoe behoren de effecten die het gevolg zijn van partikels in transport of van depositie van partikels. Ook hier is nog een verdere onderverdeling mogelijk: ecologische effecten, gezondheidseffecten en materiële schade.

In de volgende twee paragrafen (2.5.1 en 2.5.2) zullen de on- en offsite effecten die in Vlaanderen kunnen voorkomen, besproken worden.

## 2.5.1 On-site effecten

### 2.5.1.1 Bodemdegradatie

Een eerste vorm van bodemdegradatie door wind is bodemsortering. De sortering treedt op doordat de wind de fijnere deeltjes (80 tot 100  $\mu\text{m}$ ) makkelijker erodeert (Chepil, 1941) dan de grotere en zwaardere deeltjes. Hierdoor ontstaat er een relatieve stijging van het aantal grotere deeltjes in de toplaag. De graduele stijging van de deeltjesgrootte zorgt ervoor dat nutriënten sneller uitspoelen van de bodemtoplaag, waardoor een minder vruchtbare grond achterblijft (Knottnerus, 1985).

Aan het fijne, makkelijk erodeerbare materiaal is ook nog een belangrijk gedeelte van het organisch materiaal gebonden (Zenchelsky et al., 1976, Sterk et al., 1996). Bij winderosie zal er dus samen met de kleinere deeltjes een hoge concentratie aan organisch materiaal weggeblazen worden. Ook losliggende vegetatieresten worden door hun lage dichtheid gemakkelijk weggeblazen (Goossens, 2003). Als gevolg van het verlies aan organisch materiaal, wordt de bodem steeds minder vruchtbaar. Dit leidt uiteindelijk tot verminderde opbrengsten (Stallings, 1957). Ook het waterhoudend vermogen neemt af als gevolg van deze processen. Droogte wordt door veel boeren gezien als een belangrijke beperkende productiefactor van deze gedegradeerde bodems. De erosie zelf zien boeren soms als een minder groot probleem. De effecten hiervan op de bodemvruchtbaarheid worden bovendien gemaskeerd door het gebruik van (kunst)mest.

### 2.5.1.2 Landbouwkundige schade

De landbouwkundige schade blijft in Vlaanderen over het algemeen beperkt. Toch moet er soms opnieuw ingezaaid worden omdat het zaad is weggewaaid, of wordt het zaad door aangewaaid zand bedolven, waardoor het niet of pas later kiemt. Aardappelruggen kunnen in het ergste geval wegstuiven waarbij de poters bloot komen te liggen en de ruggen opnieuw gemaakt moeten worden. Ook zijn er gevallen gemeld van het afknakken van maïs, en van het corroderend (zandstralend) effect van de zandkorrels op gewassen (Poesen et al., 1996). De abrasieverschijnselen zorgen er ook voor dat de planten meer gevoelig zijn aan ziektes (Knottnerus, 1985). Volledig ontwikkelde gewassen lijden minder hard onder de effecten van winderosie dan jongere, pas kiemende planten (Banzhaf et al., 1992).

De gevoeligheid van een gewas voor winderosie wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee het gewas een voldoende bodembedekking bereikt waarbij het risico op winderosie nagenoeg nul is. De meest gevoelige gewassen zijn suikerbiet, maïs, wortel en aardappel.

Winderosie heeft ook indirecte invloeden op de landbouw. De weggeblazen grond kan in machines kruipen en naburige sloten en grachten opvullen. Wind kan er ook voor zorgen dat bemesting van het veld verwijderd wordt. Het kortafstandstransport van de geërodeerde materie van een veld kan de naburige velden besmetten met bijvoorbeeld zaden van onkruiden, chemische residu's en pathogenen (Skidmore, 1986).

## 2.5.2 Off-site effecten

Off-site effecten zijn de effecten die veroorzaakt worden buiten het brongebied waaruit het materiaal afkomstig is. Off-site effecten kunnen vrij lokaal zijn en zich beperken tot de aangrenzende windafwaartse gebieden, maar kunnen zich ook uitstrekken over grote afstanden afhankelijk van de samenstelling van het bronmateriaal.

### 2.5.2.1 Ecologische effecten

De gesuspendeerde materie die van de landbouwvelden door de wind wordt meegevoerd, bevat hoge concentraties aan organisch stof, herbiciden, pesticiden en meststoffen. Deze concentraties zijn tot tien maal hoger dan de concentraties in het moedermateriaal. Deze



materie kan bij het neerslaan de bodem vervuilen en het oppervlakte- en grondwater contamineren en eutrofiëren.

In het noordoosten van België zijn verschillende honderden km<sup>2</sup> land langzaam vervuild door depositie van partikels die door de wind vanuit zwaar vervuilde bovenwindse gebieden zijn meegevoerd (Poesen et al., 1996).

#### 2.5.2.2 Gezondheidseffecten

Fijne bodempartikeltjes die door winderosie worden verspreid, kunnen een belangrijke rol spelen in de verspreiding van ziekten bij planten, mensen en dieren. De PM<sub>10</sub>-fractie, de in de lucht aanwezige deeltjes kleiner dan 10 µm, is gedeeltelijk verantwoordelijk voor respiratorische aandoeningen (Pope et al., 1999). Aan de fijne stofdeeltjes kunnen ook zware metalen of andere giftige stoffen gebonden zijn. Wanneer deze vervuilde stofdeeltjes ingeademd worden, kunnen ze zich accumuleren in het vetweefsel van dieren en mensen en zo tot ernstige ziektes leiden.

Naast winderosie zijn er uiteraard nog andere bronnen die deeltjes in de lucht brengen, zoals verkeer, industrie of emissie uit stallen. Het aandeel van winderosie hier is moeilijk in te schatten en variabel in de tijd.

#### 2.5.2.3 Materiële schade

Op lokale schaal zijn er significante off-site effecten zoals het overstuiven van wegen en spoorwegen, het dichtwaaien van sloten, het verminderen van de verkeersveiligheid door een geringere zichtbaarheid (Goossens, 2003). Dergelijke schade komt vaak voor in semi-aride gebieden met een open landschap zoals het Midden-Oosten, Noord-Afrika, Australië of delen van Azië en Noord-Amerika, maar ze werden ook al gerapporteerd in verscheidene landen van Noordwest-Europa waaronder België (Robinson, 1968; De Meester 1982; Poesen et al., 1996).

Wanneer stof in landbouw- en andere machines binnendringt, kan dit voor ernstige schade aan de machines zorgen (Goossens, 2003).

## **2.6 Maatregelen tegen winderosie**

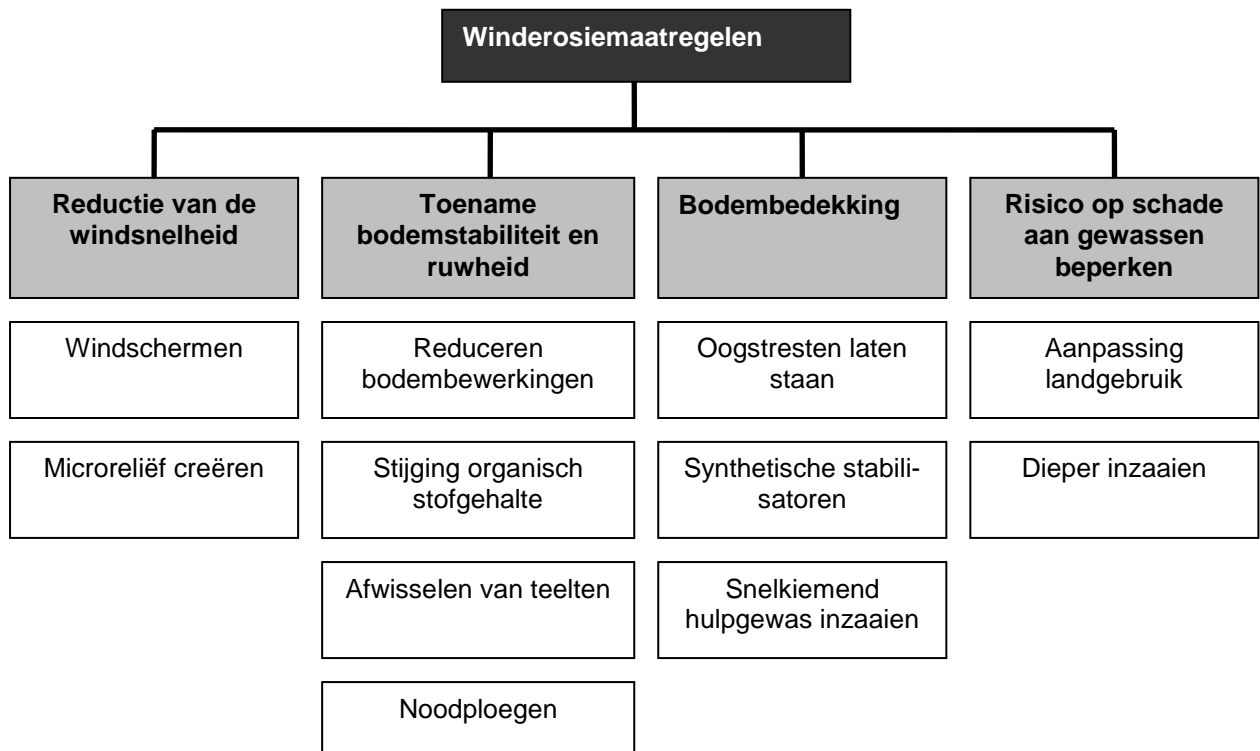
Winderosie kan door verscheidene maatregelen gereduceerd worden. Vele landbouwers passen echter enkel maatregelen toe om hun belangrijkste gewassen te beschermen. Hierdoor is er in het merendeel van de bedrijven veelal een gebrekkige bescherming van de bodem in de periode tussen de oogst en de groei van het volgende gewas (Riksen et al., 2003a, 2003b). Volgens Bossuyt et al. (2005) wordt er bij de bestrijdingsmaatregelen weinig aandacht besteed aan de off-site en langetermijneffecten van winderosie. Naarmate de kennis over de schadelijke gevolgen van fijn stof voor de gezondheid vermeerdert, wordt er toch meer en meer aandacht besteed aan maatregelen ter beperking ervan (Bossuyt et al., 2005).

Winderosie kan op verschillende manieren geminimaliseerd worden. Landbouwers kunnen de windsnelheid nabij het oppervlak reduceren, de bodemruwheid, de bodemstabiliteit en de bodembedekking laten toenemen en het risico op schade aan de gewassen beperken (Figuur 7) (FAO, 1960). Deze maatregelen hebben een grote overeenkomst met de inspanningen die de landbouwers leveren in het bestrijden van watererosie. Veel maatregelen tegen watererosie, zijn ook effectief tegen winderosie.

### **2.6.1 Reductie van de windsnelheid nabij het bodemoppervlak**

Door het afremmen van de windsnelheid tot een snelheid lager dan deze die nodig is om bodemdeeltjes in beweging te brengen (kritische sleepsnelheid), kan de erosiviteit van de wind sterk beperkt worden.

De windsnelheid kan gereduceerd worden door het aanbrengen van windschermen op de akkerranden. Het windscherm kan worden opgebouwd uit dode of levende materie. Hagen en windschermen geven bescherming tegen winderosie tot op een afstand van 10 tot 12 keer de hoogte van het scherm (Morgan, 1995). De grootte, de porositeit en de oriëntatie van het windscherm ten opzichte van de erosieve winden, bepalen de oppervlakte waaraan het protectie biedt (Riksen et al., 2003c). Cornelis en Gabriels (2005) vonden dat een porositeit tussen 25 en 40% de hoogste bescherming tegen winderosie bood. Een enkele rij bomen met een over de hoogte gelijk verdeelde porositeit is hiervoor voldoende (Cornelis en Gabriels, 2005). Het scherm dient bovendien loodrecht op de overheersende windrichting te staan (Dierick et al., 2002). Een voorbeeld van een goed windscherm is weergegeven in Figuur 8.



**Figuur 7.** Schematisch overzicht van de maatregelen tegen winderosie

Door loodrecht op de dominante windrichting in te zaaien, creëert de landbouwer een micro-reliëf waarbij ook de windsnelheid nabij het oppervlak vermindert (Zobeck, 1991).

### 2.6.2 Toename van de bodemstabiliteit en ruwheid

Toename van de bodemstabiliteit en ruwheid zorgen ervoor dat de kritische sleepsnelheid verhoogd wordt, waardoor de kans dat deze overschreden wordt, afneemt. De kritische sleepsnelheid kan verhoogd worden door de bodemdeeltjes minder gevoelig te maken voor deflatie.

In gebieden die heel gevoelig zijn voor winderosie is het aangeraden om de bodem zo ruw mogelijk te houden. Grote bodemaggregaten zijn minder gevoelig aan winderosie en daarboven reduceren ze de windsnelheid aan het bodemoppervlak (Riksen et al., 2003b). Het reduceren van bodembewerkingen zorgt ervoor dat aggregaten behouden blijven. Ook een stijging van het organische stofgehalte draagt bij tot de vorming van stabielere bodemaggregaten. Sinds de beschikbaarheid van goedkope kunstmeststoffen is het gebruik van organi-

sche mest sterk gedaald. Dit heeft geleid tot een grotere erodibiliteit van lichte zandbodems (Riksen et al., 2003).



**Figuur 8.** Windscherm met een optimale porositeit in Nebraska, Amerika (WERU, 2008)

De afwisseling van teelten met een verschillende bodembedekkinggraad en/of bodemruwheid zorgen ervoor dat de kritische sleepsnelheid minder snel bereikt wordt.

Wanneer een perceel onbedekt is, kan er aan noodploegen gedaan worden. Door dit noodploegen worden namelijk grote, ruwe kluiten ter hoogte van het maaiveld gevormd die ervoor zorgen dat de bodem minder winderosiegevoelig wordt. Hetzelfde effect kan worden gecreëerd wanneer bij het oogsten de stoppels of de gewasresten op het veld achterblijven (Hudson, 1981).

### **2.6.3 Bodembedekking**

Een volledig bedekte bodem zal niet aan winderosie gevoelig zijn. Omdat niet elke bodem op eender welk moment volledig bedekt kan zijn, moet er dus worden naar gestreefd om de onbedekte periodes tot een minimum te beperken of om altijd een zekere minimale bodembedekking te behouden. Dit kan door de oogstresten te laten staan, stro te laten liggen, synthetische stabilisatoren te gebruiken en mest toe te dienen. Ook kan een snel kiemend hulpgewas worden ingezaaid enkele weken voor het hoofdgewas. Het hulpgewas geeft een be-

scherming aan het hoofdgewas totdat deze zelf een voldoende bodembedekking heeft bereikt. Het hulpgewas wordt vervolgens gedood om verdere concurrentie met het hoofdgewas te voorkomen. In Nederland wordt dit systeem vooral gebruikt bij de suikerbietenteelt en de aardappelteelt in de Veenkoloniën in Drente en Groningen.

#### **2.6.4 Risico op schade aan gewassen beperken**

Het beperken van het risico op schade aan gewassen heeft als doel het financiële risico te verminderen bij het uitoefenen van landbouw op erosiegevoelige gronden.

Op hoge erosiegevoelige gronden kan men best geen gewassen planten die nog eens extra bijdragen tot de erosiegevoeligheid, zoals suikerbieten en aardappelen. Soms is het zelfs aan te raden om het landgebruik op deze gronden te wijzigen tot bos, permanent grasland of andere permanente gewassen. De mate waarin een gewas een bodem beschermt hangt af van de snelheid waarmee het gewas de bodem bedekt en van hoelang de bodem bedekt blijft door het gewas. De mate van bescherming per gewas zit onder de vorm van het platliggend–graangewas-equivalent ( $SG_e$ ) verwerkt in de vegetatiefactor  $V$  van WEQ (zie paragraaf 4.1.5).

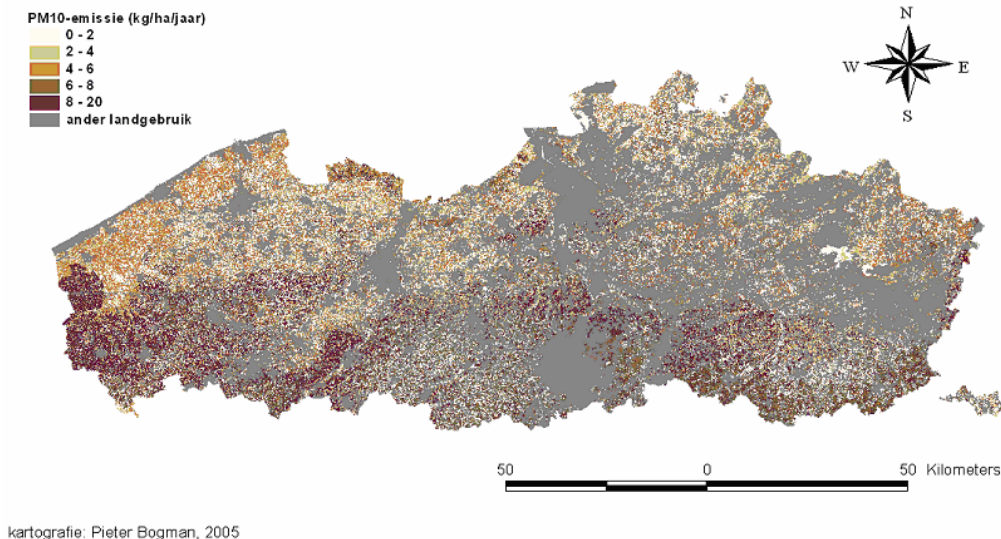
Sommige maatregelen zijn zodanig gefocust op het minimaliseren van de kans op gewasbeschadiging door bijvoorbeeld abrasie, dat het risico op winderosie niet gereduceerd wordt. Een voorbeeld van dergelijke praktijk is het dieper zaaien. Hierdoor wordt de kieming vertraagd en daalt het risico op ernstige schade aan het gewas aanzienlijk, maar wordt het erosierisico niet verlaagd (Riksen et al., 2003b). Ze wordt door de latere kieming zelfs verhoogd door de langere periode van braak.

### **3 Selectie van het geschikte winderosiemodel voor Vlaanderen**

Winderosiemodellen trachten de interacties tussen de verschillende factoren die het winderosieproces beïnvloeden te verklaren en de hoeveelheid bodemverlies te voorspellen. Omdat er heel wat factoren betrokken zijn in het winderosieproces (zie paragraaf 2.4), hebben deze modellen een hoge complexiteit. Het aantal beschikbare winderosiemodellen is in vergelijking met modellen voor watererosie vrij beperkt.

#### **3.1 Randvoorwaarden voor een geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen**

Uit de verscheidenheid aan beschikbare winderosiemodellen moet een geschikt model gekozen worden om het winderosierisico in Vlaanderen te begroten. Het model moet daarom op de ruimere schaal van Vlaanderen kunnen toegepast worden. Hierdoor mag het model niet te detailrijke inputdata vereisen. De output van het model moet ook gekoppeld kunnen worden aan de kaart voor verlies van bodem meegevoerd door wind t.g.v. bodembewerkingen berekend op perceelsniveau (zoals de  $PM_{10}$ -emissiekaart t.g.v. bodembewerkingen in Vlaanderen; Figuur 9). Bodemverlies t.g.v. bodembewerkingen vormt een belangrijk aandeel in het totale bodemverlies onder invloed van de wind vanaf akkerland in Vlaanderen. Bodemverlies t.g.v. winderosie wordt dus best tot op perceelsniveau doorgerekend, en dit met een temporele resolutie van een of drie jaar (cfr. gewasrotatiekaart).



**Figuur 9.** Risico voor PM<sub>10</sub>-emissie t.g.v. bodembewerkingen per landbouwperceel in Vlaanderen (Bogman et al., 2006)

## 3.2 Keuze van een geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen

### 3.2.1 Wind Erosion Equation (WEQ)

De Wind Erosion eQuation (WEQ) werd ontwikkeld door Dr. W. S. Chepil na tientallen jaren van onderzoek naar de belangrijkste factoren die het winderosieproces beïnvloeden (Woodruff and Siddoway, 1965). Deze factoren zijn de bodemerodibiliteit, de erosiviteit en het actuele landgebruik. WEQ genereert de gemiddelde hoeveelheid bodemerrosie door wind van een gegeven veld uitgedrukt in massa (ton) per oppervlakte-eenheid (are) per jaar (Woodruff and Siddoway, 1965).

WEQ bestaat uit een functionele relatie van vijf beïnvloedende factoren (Chepil and Woodruff, 1963):

$$E = f(I, K, C, L, V) \quad (3)$$

met  $E$  het jaarlijks bodemverlies door winderosie ( $\text{ton ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ ),  $f$  functionele relatie,  $I$  de bodemerodibiliteitsindex ( $\text{ton ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ ),  $K$  de bodemruwheidsfactor (-),  $C$  de klimaatsfactor (-),  $L$  de lengte van het veld in de overheersende windrichting (m),  $V$  een maat voor de bedekkinggraad (-).

De mathematische relatie tussen de factoren is o.w.v. hun interacties vrij ingewikkeld. In tegenstelling tot de “Universal Soil-Loss Equation” (USLE) voor watererosie, kunnen bij WEQ de beïnvloedende factoren niet simpelweg vermenigvuldigd worden. Oorspronkelijk maakte WEQ gebruik van grafische en tabelmatige oplossingen. Deze werden door Woodruff en Siddoway (1965) voor het eerst ontwikkeld voor de Amerikaanse Great Plains en later aangepast voor de rest van de Verenigde Staten (Skidmore en Woodruff, 1968). In de jaren '70 werden wiskundige vergelijkingen opgesteld en werd WEQ ook toepasbaar voor andere regio's buiten de VS (Skidmore et al., 1970). De laatste richtlijnen werden in 2002 gepubliceerd door de National Resources Conservation Service van de USDA in de National Agronomy Manual.

De factoren  $C$ ,  $I$ ,  $K$ ,  $L$  en  $V$  in WEQ zijn jaarlijkse waarden en bestaan uit gegroepeerde veranderingen (11) die elk een invloed hebben op winderosie.

Omwille van de eenvoudige empirische modelopbouw en het beperkt aantal inputgegevens is WEQ toepasbaar op regionale schaal. Deze invoergegevens zijn beschikbaar in Vlaanderen of kunnen afgeleid worden van andere beschikbare variabelen. Het model is geschikt voor periodes van één jaar of langer.

Gelijkaardige studies als deze werden al met WEQ uitgevoerd in Oostenrijk (Klik, 2004) en op het Columbia Plateau in Amerika (Papendick, 1998). Deze studies toonden aan dat WEQ zeer geschikt is voor het modelleren van winderosie op een ruimere schaal.

Ook de analogie met het RUSLE-model, dat werd aangewend bij het opstellen van de Actuele Erosiekaart (Figuur 10) voor Vlaanderen (Van Rompaey et al., 2000) spreekt in het voordeel van WEQ.

### **3.2.2 Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)**

De Revised Wind Erosion eQuation (RWEQ), dat een combinatie is van een empirisch en een fysisch model, is een aanpassing van WEQ. Het is het eerste winderosiemodel dat uitvoerig getest werd met veldmetingen onder zeer verschillende condities, zowel binnen als buiten de Amerikaanse Great Plains.





**Figuur 10.** Actuele erosiekaart van Vlaanderen (Van Rompaey et al., 2000)

RWEQ simuleert het massatransport, dat gelijk is aan de massa bodemtransport door de wind over een eenheidsbreedte tot een hoogte van 2 m boven het bodemoppervlak (Fryrear et al., 2001). De invoergegevens nodig voor RWEQ om het bodemverlies van landbouwgronden te berekenen bevatten factoren voor het weer, de bodem, het gewas, het veld, de bewerkingmethode en indien van toepassing een factor voor irrigatie.

Bij RWEQ wordt het massatransport bepaald door:

$$Q_x = Q_{max} \left( 1 - e^{-\left(\frac{X}{s}\right)^2} \right) \quad (4)$$

met  $Q_x$  het massatransport ( $\text{kg m}^{-1}$ ) over een bepaalde veldlengte  $X$  (m),  $Q_{max}$  de maximale transportcapaciteit van de wind over een specifiek bodemoppervlak ( $\text{kg m}^{-1}$ ),  $s$  de kritische veldlengte waar  $Q_x$  gelijk is aan 63,2% van  $Q_{max}$ .

$Q_{max}$  en  $s$  worden voorspeld m.b.v. volgende vergelijkingen:

$$Q_{max} = 107.8 (WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \quad (5)$$

en

$$s = 146.86 (WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)^{-0.413} \quad (6)$$

met: *WF* de weersfactor, *EF* de bodemerodibiliteitfactor, *SCF* de bodemkorstfactor, *K'* de bodemruwheid, *COG* de vegetatiefactor.

Aan de hand van deze vergelijkingen voorspelt RWEQ de hoeveelheid bodemerosie voor een tijdsinterval van 2,5 maand tot één jaar.

Doordat RWEQ zich beperkt tot twee meter hoogte kan het niet toegepast worden op plaatsen waar er fijn, zwevend stof moet worden ingecalculereerd. Dit fijn stof blijft niet beperkt tot de onderste twee meter en gaat ook in suspensie op grotere hoogten. Veldmetingen uitgevoerd door Bogman et al. (2006) hebben aangetoond dat in de Vlaamse Ardennen dit fijn stof echter een belangrijk aandeel van de totale hoeveelheid winderosie kan zijn. Toepassen van RWEQ op Vlaanderen zou een onderschatting van het totale winderosierisico kunnen opleveren. Bovendien is RWEQ minder geschikt voor grotere regio's.

### **3.2.3 Wind Erosion Prediction System (WEPS)**

Het Wind Erosion Prediction System (WEPS) (Hagen, 1991) is een in de VS ontwikkeld procesgebaseerd computermodel dat dagelijkse hoeveelheden bodemverlies simuleert aan de hand van de dagelijkse klimaat- en veldcondities, samen met de uurlijkse windsnelheid. WEPS voorspelt tevens de samenstelling en de hoeveelheid van deeltjes die door de verschillende winderosietransportmechanismen worden vervoerd. WEPS kan wegens zijn procesmatige basis ook op regio's buiten de VS toegepast worden (Funk et al., 2004). De grootste nadelen van WEPS zijn dat het model niet geschikt is voor grotere regio's en dat het model zeer specifieke en gedetailleerde invoergegevens nodig heeft. Het simulatiegebied van WEPS is beperkt tot een veld of een paar aangrenzende percelen.

Het simulatieprogramma is opgebouwd uit verschillende submodellen: klimaat, hydrologie, management, bodem, gewas, afbraak en erosie. Deze submodellen gaan de veranderingen van de erosiegevoeligheid van de bodem door weersinvloeden na. Het voordeel van deze modulaire opbouw is dat een onderzoeksteam gemakkelijk verschillende delen kan testen en aanpassen aan nieuwe technologieën.

WEPS combineert dus dagelijkse klimaat- en veldcondities met uurlijkse windsnelheden om een uurlijkse hoeveelheid erosie te voorspellen. Door deze hoge temporele resolutie van WEPS zijn er te gedetailleerde gegevens nodig die niet voor handen zijn voor Vlaanderen.

### **3.2.4 Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC)**

WEQ (Woodruff and Siddoway, 1965) werd aangepast door Cole et al. (1982) voor gebruik in EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). De originele vergelijking berekent de gemiddelde jaarlijkse winderosie als een functie van de bodemerodibiliteit, klimaatsfactor, bodemruwheid, veldlengte langs de dominante windrichting en vegetatieve bedekking. De belangrijkste aanpassing van het model bestond er in dat er in plaats van jaarlijkse, dagelijkse voorspellingen van winderosie konden worden gedaan. Twee van de beïnvloedende factoren, de bodemerodibiliteit en de klimaatsfactor, blijven constant voor elke dag van het jaar. De andere variabelen zijn onderhevig aan dagelijkse veranderingen. De bodemruwheid is een functie van de hoogte van de aanwezige ruggen en de afstand tussen de ruggen. Deze ruggen kunnen van natuurlijke aard zijn, maar kunnen ook ontstaan ten gevolge van bodembewerkingen. De veldlengte langs de overheersende windrichting wordt berekend door de dimensies van het veld en de oriëntatie van de windrichting in rekening te brengen. De factor equivalent aan de vegetatieve bedekking wordt dagelijks gesimuleerd als een functie van de rechtopstaande levende biomassa, het rechtopstaand dood residu en het platliggend gewasresidu. De dagelijkse windenergie wordt geschat door een niet-lineaire functie van de windsnelheid (Williams en Arnold, 1997).

Net als WEPS vereist ook EPIC te gedetailleerde gegevens, die op de schaal van Vlaanderen niet beschikbaar zijn, om dagelijkse erosiehoeveelheden door wind te voorspellen.

### **3.2.5 Texas Tech Wind Erosion Analysis Model (TEAM)**

Het Texas Tech Wind Erosion Analysis Model (TEAM), ontwikkeld door Gregory et al. (2004) in de VS is een procesgebaseerd wiskundig model dat het losmaken, verplaatsen en afzetten van bodempartikels door wind voorspelt. TEAM simuleert ook het in suspensie gaan en het bewegen van stof boven de eroderende gebieden en windafwaarts ervan. Het model bestaat uit verschillende wiskundige vergelijkingen. Elk vergelijking beschrijft een fysisch proces dat winderosie beïnvloedt.

De parameters nodig om het model te laten lopen zijn vaak een functie van andere processen en variabelen: windsnelheid, relatieve vochtigheid, bodemdeeltjesdistributie, kleipercantage, vegetatie (onbegroeide bodem, gras, wisselbouw), bodemtype, neerslag, veldlengte, windschermhogte en porositeit.

Het potentiële bodemverlies kan met TEAM bepaald worden voor maximaal tien naast elkaar liggende percelen.

Aan de geïntegreerde vorm van het TEAM-model zijn verschillende voordelen verbonden. Ten eerste is er een minimale hoeveelheid aan data nodig en vertonen de grenswaarden een hoge stabiliteit. Ook de fysische basis van het model is een pluspunt voor onderzoekers en programmeurs. Het model heeft wel één belangrijk nadeel dat zijn toepasbaarheid voor Vlaanderen hypothekeert. De bodemerodibiliteit kan namelijk niet aangepast worden aan de neerslaghoeveelheid, maar wordt berekend op basis van het bodemvochtgehalte. Cornelis en Gabriels (2003b) toonden aan dat het effect van het vochtgehalte op deflatie in TEAM foutief wordt geschat. Zoals eerder aangehaald, is deze factor van groot belang in het vochtige klimaat van Vlaanderen.

### **3.2.6 Wind Erosion Assessment Model (WEAM)**

Het Wind Erosion Assessment Model (WEAM) is een combinatie van een empirisch en een fysisch model dat ontwikkeld werd in Australië (Shao et al., 1996). WEAM berekent erosie van een droge, onbedekte bodem bij een gegeven windsnelheid zonder de vegetatieve bedekking, beheersmaatregelen en andere klimaatsfactoren dan wind in rekening te brengen (Fryrear, 1998).

De voornaamste parameter in dit model is de deeltjesgrootteverdeling van de bodem. Het model is gelimiteerd tot het beschrijven van de mobilisatie van zand en stof in of rond erosiebrongebieden (Shao et al., 1996)

WEAM is dus niet geschikt voor modellering van winderosie in Vlaanderen omdat er slechts op een indirecte manier rekening gehouden wordt met het klimaat en de vegetatieve bedekking. Deze factoren hebben in Vlaanderen een sterke invloed die zeker in rekening gebracht moeten worden. Klimaat wordt in rekening gebracht via het bodemvochtgehalte dat slechts via een bodemhydrologisch model kan gesimuleerd worden. Zijn beperkt toepassingsgebied, enkele percelen, maakt dat het model niet geschikt is om het te gebruiken op de ruimere schaal van Vlaanderen.

### 3.2.7 Wind Erosion on European Light Soils (WEELS)

Het WEELS-model (Wind Erosion on European Light Soils) voorspelt de ruimtelijke spreiding van winderosierisico op lange termijn in termen van erosie-uren (het aantal uren dat de sleepsnelheid groter is dan de kritische sleepsnelheid) en windgeïnduceerde bodemverlies. De structuur van WEELS bestaat uit een modulaire combinatie van verschillende benaderingen en algoritmes, die toegepast worden op beschikbare of makkelijk verkrijgbare topografische en meteorologische gegevens (Böhner et al., 2003).

Zoals eerder aangehaald bestaat het model uit verschillende modules. Een eerste groep omvat de dynamisch veranderlijken die bijdragen tot het tijdelijk karakter van de klimaatervisiteit. Deze groep bestaat uit drie modules: de wind-, de winderosiviteits- en de bodemvochtigheidsmodule. Een tweede groep modules weerspiegelt de temporele bodem- en vegetatieveranderlijken die een invloed hebben op de bodemerodibiliteit. Deze tweede groep bestaat ook uit drie modules: de bodemerodibiliteits-, de bodemruwheids- en de landgebruiksmodule.

De invloed van windschermen en afsluitingen wordt in rekening gebracht door een reductiefactor toe te passen voor de sleepsnelheid in afgeschermdes zones. Volgens de door Düwel (1995) uitgevoerde veldmetingen is de reductiefactor gebruikt in RWEQ (Fryrear et al., 1998) de meest geschikte factor.

De huidige vorm van het WEELS-model heeft een beperkte toepasbaarheid van de bodemvochtigheidsmodule. Die kan door de vereenvoudigde parametrisatie van de bodemwaterbalans enkel gebruikt worden voor zandige bodems. Het model is dus niet geschikt voor Vlaanderen waar niet alleen zandbodems worden onderzocht. Bovendien houdt het model enkel rekening met het saltatieproces en niet met de suspensiecomponent, die dus in Vlaanderen ook van belang is.

Tot slot is het WEELS-model ook niet toepasbaar op ruimere schaal. Volgens Böhner et al. (2003) is het model maar toepasbaar op gebieden van maximaal 5 km x 5 km met een horizontale ruimtelijke resolutie van 25 m x 25 m.

### **3.3 WEQ als geschikt winderosiemodel voor Vlaanderen**

Van de zeven hierboven besproken modellen is er maar één model, het Wind Erosion eQuation-model (WEQ) dat aan al de randvoorwaarden (zie paragraaf 3.1) voldoet. WEQ kan met name op grote ruimtelijke schaal en met een minimale input van data toegepast worden. Bovendien zijn de temporele en ruimtelijke resolutie van de modeloutput van WEQ geschikt voor deze studie. Om deze redenen wordt er in deze studie verder met WEQ gewerkt. De andere modellen zijn vaak veel te gedetailleerd. Het toepassingsgebied van deze modellen is dan beperkt tot een individueel veld of een veld met enkele aangrenzende percelen.

## 4 Modelleren van het winderosierisico in Vlaanderen

Gezien in voorliggende studie gebruikt wordt gemaakt van WEQ, wordt in dit hoofdstuk dieper ingegaan op de verschillende factoren van WEQ en hoe deze kunnen worden bepaald voor Vlaanderen. In het tweede deel van dit hoofdstuk wordt aan de hand van deze factoren een risicokaart voor winderosie in Vlaanderen opgesteld. Dit gebeurt met behulp van ArcGIS 9.2 en ArcView 3.3. Tot slot zal de winderosierisicokaart van Vlaanderen gevalideerd worden aan de hand van enquêtes die bij verschillende landbouwers werden afgenomen.

### 4.1 Bepaling van de WEQ-factoren voor Vlaanderen

#### 4.1.1 De bodemerodibiliteitsindex $I$

De basis van WEQ is de bodemerodibiliteitsindex  $I$ . De bodemerodibiliteitsindex  $I$  is het potentieel bodemverlies uitgedrukt in ton per hectare per jaar voor een uitgestrekt, onbeschermd, geïsoleerd veld met een glad, onbegroeid bodemoppervlak zonder korstvorming (Woodruff en Siddoway, 1965).

De WEQ-handleiding (NRCS, 2003) schrijft voor om  $I$  te bepalen op basis van Wind Erodible Groups (WEG) of op basis van de erosieve fractie (EF) (het percentage aggregaten kleiner dan 0,84 mm). Tabel 1 toont hoe de  $I$ -waarden bepaald kunnen worden in functie van het percentage aggregaten groter dan 0,84 mm. In deze tabel is elke waarde gelijk aan een bepaald procent waar het tiental af te lezen is in de eerste kolom en de verdere onderverdeling in eenheden in de eerste rij te vinden is.

Vraag is of deze cijfers en PTFs zo maar kunnen worden geëxtrapoleerd naar Vlaamse bodems. Bovendien kunnen de WEGs, het percentage aggregaten <0,84 mm en de PTFs niet zomaar worden aangewend om de ruimtelijk beschikbare bodemdata, met name de bodemkaart van Vlaanderen en haar zeven textuurklassen, om te zetten naar een erodibiliteitskaart.

**Tabel 1.** Erodibiliteitsfactor in functie van de niet-erodeerbare fractie (Woodruff & Siddoway, 1965)

		Bodemerodibiliteit (ton ha <sup>-1</sup> ) in functie van de bodemfractie > 0,840 mm									
Percentage	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	-	695	560	493	437	404	381	359	336	314	
10	300	294	287	280	271	262	253	244	238	228	
20	220	213	206	202	197	193	186	182	177	170	
30	166	161	159	155	150	146	141	139	134	130	
40	126	121	117	114	112	108	105	101	96	92	
50	85	80	75	70	65	61	58	54	52	49	
60	47	45	43	40	38	36	36	34	31	29	
70	27	25	22	18	16	13	9	7	7	4	
80	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Om per bodemtextuurklasse op de bodemkaart van Vlaanderen de bodemerodibiliteitsfactor te bepalen werden metingen uitgevoerd in de windtunnel van het International Centre for Eremology, Universiteit Gent (zie 4.1.1.1.). Hierbij werd voor 13 bodemstalen bodemverlies gemeten via weging van bodempannen (balansmethode) enerzijds en door opvang van het geërodeerde materiaal met zgn. Wilson & Cooke-vangers anderzijds. Daarnaast werd de aggregaatsinstabiliteitsindex IS en de erosieve fractie EF (percentage aggregaten < 0,84 mm) op alle bodemstalen bepaald. Badreldin (2008) concludeerde dat de balansmethode het meest geschikt was om de bodemerodibiliteitsindex *I* van de Vlaamse bodems te bepalen. Voor meer details over de methode verwijzen we naar 4.1.1.2. De 13 bodemstalen werden zo gekozen dat alle zeven hoofdklassen van de Belgische bodemclassificatie (U, E, A, L, P, S, Z) minstens één maal vertegenwoordigd waren. Deze hoofdtextuurklassen zijn ook te vinden op de Belgische bodemkaart, die in een later stadium wordt gebruikt. Tabel 3 geeft een overzicht van het zand-, leem- en kleigehalte van de stalen, alsook de locatie van de staalname en hun textuurklasse.

Tabel 2 toont WEGs en dus ook *I*-waarden op basis van een kwalitatieve beschrijving van de bodem. Daarnaast stelden Fryrear et al. (1994) en López et al. (2007) pedotransferfuncties (PTFs) op om EF op basis van klei-, leem-, zand- en organisch koolstofgehalte te schatten. Vraag is of deze cijfers en PTFs zo maar kunnen worden geëxtrapoleerd naar Vlaamse bodems. Bovendien kunnen de WEGs, het percentage aggregaten <0,84 mm en de PTFs niet zomaar worden aangewend om de ruimtelijk beschikbare bodemdata, met name de bodemkaart van Vlaanderen en haar zeven textuurklassen, om te zetten naar een erodibiliteitskaart.



**Tabel 2.** De 7 winderodibiliteitsgroepen met hun overeenkomstige bodemtextuurklassen, niet-erodeerbare fractie en erodibiliteitsfactor (NRCS, 2003)

Wind- erodibiliteits- groep (WEG)	Bodemtextuur	Fractie groter dan 0,840 mm (%)	Bodem- erodibiliteits- factor (ton ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> )
1	Very fine sand, fine sand or coarse sand	1	695
		2	560
		3	493
		5	404
		7	359
2	Loamy very fine sand, loamy fine sand, loamy sand, loamy coarse sand or sapric soil materials	10	300
3	Very fine sand loam, fine sandy loam, sandy loam or coarse sandy loam	25	193
4	Clay, silty clay, noncalcareous clay loam, or silty clay loam with more than 35 percent clay content	25	193
4L	Calcareous loam and silt loam or calcareous clay loam and silty clay loam	25	193
5	Noncalcareous loam and silt loam with less than 20 percent clay content or sandy clay loam, sandy clay and hemic organic soil materials	40	126
6	Noncalcerous loam and silt loam with more than 20 percent clay content or noncalcereous clay loam with less than 35 percent clay content	45	108
7	Silt, noncalcareous silty clay loam with less than 35 percent clay content and fibric organic soil material	50	85
8	Soils not susceptible to wind	>80	0

Om per bodemtextuurklasse op de bodemkaart van Vlaanderen de bodemerodibiliteitsfactor te bepalen werden metingen uitgevoerd in de windtunnel van het International Centre for Eremology, Universiteit Gent (zie 4.1.1.1.). Hierbij werd voor 13 bodemstalen bodemverlies gemeten via weging van bodempannen (balansmethode) enerzijds en door opvang van het

geërodeerde materiaal met zgn. Wilson & Cooke-vangers anderzijds. Daarnaast werd de aggregaatsinstabiliteitsindex IS en de erosieve fractie EF (percentage aggregaten < 0,84 mm) op alle bodemstalen bepaald. Badreldin (2008) concludeerde dat de balansmethode het meest geschikt was om de bodemerodibiliteitsindex I van de Vlaamse bodems te bepalen. Voor meer details over de methode verwijzen we naar 4.1.1.2. De 13 bodemstalen werden zo gekozen dat alle zeven hoofdklassen van de Belgische bodemclassificatie (U, E, A, L, P, S, Z) minstens één maal vertegenwoordigd waren. Deze hoofdtextuurklassen zijn ook te vinden op de Belgische bodemkaart, die in een later stadium wordt gebruikt. Tabel 3 geeft een overzicht van het zand-, leem- en kleigehalte van de stalen, alsook de locatie van de staalname en hun textuurklasse.

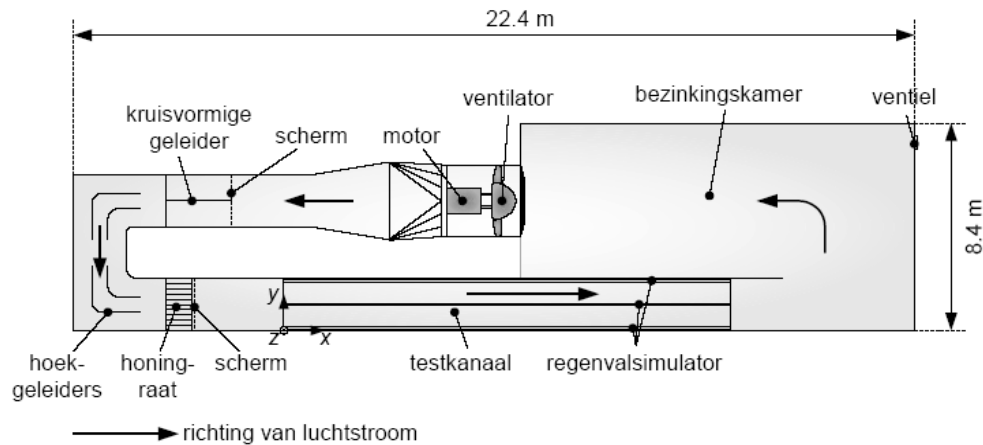
**Tabel 3.** Textuurklasse, klei-, leem- en zandgehalte, en de locatie van de staalname van de bodemstalen

<b>Textuurklasse</b>	<b>% zand (&gt;50µm)</b>	<b>% leem (2-50µm)</b>	<b>% klei (&lt;2µm)</b>	<b>locatie staalname (UTM WGS 84)</b>
1. Klei (E)	42,4	30,3	27,3	51,06234 N 4,09908 E
2. Lemig zand (S)	78,0	16,8	5,1	51,01658 N 4,16527 E
3. Zandleem (L)	31,8	54,8	13,3	51,02244 N 4,13231 E
4. Licht zandleem (P)	68,7	23,7	7,6	50,97901 N 4,13596 E
5. Zand (Z)	84,3	8,0	7,7	50,93493 N 4,17038 E
6. Zandleem (L)	47,1	40,6	12,3	51,01055 N 4,09241 E
7. Klei (E)	46,1	25,1	28,8	51,01712 N 4,08261 E
8. Zware Klei (U)	20,6	44,2	35,2	50,91461 N 4,67444 E
9. Licht zandleem (P)	65,0	26,3	8,6	50,95794 N 4,66361 E
10. Lemig zand (S)	80,2	7,1	12,7	50,97252 N 4,70887 E
11. Zware Klei (U)	50,7	0,4	48,9	50,98693 N 4,57884 E
12. Duinzand	95,9	2,7	1,4	51,24819 N 2,95827 E
13. Leem (A)	10,3	74,8	17,5	50,85191 N 4,79516 E

#### 4.1.1.1 De I.C.E.-windtunnel

De I.C.E-windtunnel is een lage-snelheidswindtunnel van het blazende type. De windtunnel is gemaakt uit dunne metaalplaten en vormt een gesloten circuit (Figuur 11). De luchtstroom wordt gegenereerd door een axiale ventilator met een diameter van 1,5 m. De ventilator bestaat uit 16 verstelbare schoepen (Figuur 12a). De windsnelheid kan geregeld worden door

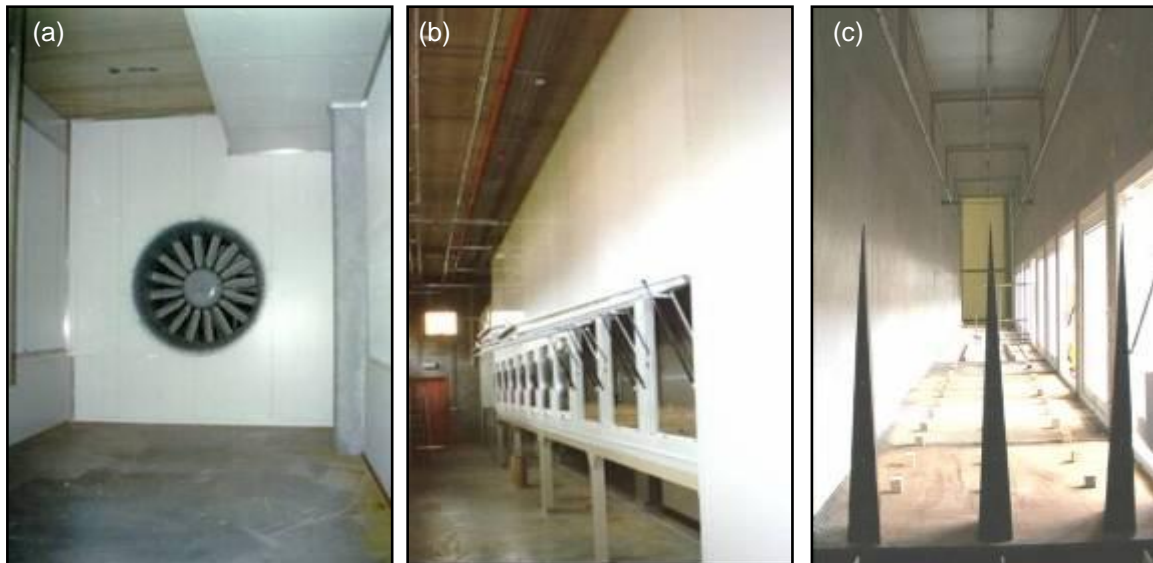
de hoek van de schoepen te wijzigen. Om het kolkeffect veroorzaakt door de rotatie van de schoepen te reduceren, de turbulentie te onderdrukken en de luchtstroom zo veel mogelijk te stroomlijnen zijn een aantal componenten in het kanaal voor de testsectie aangebracht: een contractieconus, een scherm, een kruisvormige geleider, hoekgeleiders en een honingraat met scherm (Cornelis et al., 2004a).



**Figuur 11.** Schematisch bovenaanzicht van de I.C.E-windtunnel (Cornelis et al., 2004a)

Windafwaarts van de honingraatconstructie komt de lucht in de testsectie met rechthoekige dwarssectie terecht, waar een minimale windsnelheid van  $6,40 \text{ m s}^{-1}$  heerst. De testsectie, waar alle metingen worden uitgevoerd, is 12 m lang en 1,20 m breed (Figuur 12b,c). De hoogte is verstelbaar van 1,80 m tot 3,20 meter (Cornelis et al., 2004a).

Verder windafwaarts bevindt zich de bezinkingskamer met een volume van  $284 \text{ m}^3$  (Figuur 12a). Door het grote volume van deze kamer zal het relatief grove sediment dat met de luchtstroom wordt meegevoerd hier bezinken. Fijn stof daarentegen heeft een te laag gewicht om in de bezinkingskamer neer te slaan. Om te vermijden dat deze fijnere deeltjes in de lucht kunnen circuleren en zo de metingen negatief beïnvloeden, werd aan het einde van de testsectie een filterdoek bevestigd.



**Figuur 12.** De I.C.E.–windtunnel: de sedimentatiekamer en de ventilator met 16 verstelbare schoepen (a), de testsectie gezien van de buitenkant (b) en de testsectie gezien van de binnenkant (c)

#### 4.1.1.2 De balansmethode in de windtunnel

De balansmethode laat toe de totale hoeveelheid erosie zo accuraat mogelijk te meten bij een windtunnelproef. Bij deze methode werd een pan van 40 cm lang, 20 cm breed en 2cm hoog (Figuur 13) gevuld met luchtdroog bodemmateriaal dat werd gezeefd op een 2-mm zeef. Preliminair testen met grotere en kleinere pannen toonden aan dat de gebruikte pannen voldoende groot waren. Het werken met gezeefde bodem i.p.v. met ongestoorde stalen heeft als voordeel dat de metingen niet afhankelijk zijn van de actuele grootteverdeling van de aggregaten. Deze wijzigt immers sterk gedurende het jaar. Het gebruik van ongestoorde bodemstalen laat bijgevolg niet toe om op gestandaardiseerde en reproduceerbare manier erodibiliteit van bodems te bepalen.



**Figuur 13.** De testpan van 40 cm x 20 cm x 2 cm gevuld met duinzand

Deze schaal werd in de windtunnel geplaatst zodat de bovenkant van de schaal op dezelfde hoogte lag als de vloer van de testsectie van de windtunnel. Rondom de schaal werd schuurpapier met ongeveer dezelfde oppervlakteruwheid als een onbedekte bodem aangebracht. Onder de met bodemmateriaal gevulde schaal werd een elektronische balans met een precisie van 0,1 g geplaatst (Figuur 14). De balans liet toe gedurende het 180-seconden durende experiment dat werd uitgevoerd bij verschillende windsnelheden (11,0 m s<sup>-1</sup>, 11,5 m s<sup>-1</sup>, 12,0 m s<sup>-1</sup>, 12,5 m s<sup>-1</sup>, 13,0 m s<sup>-1</sup>, 13,5 m s<sup>-1</sup>, 14,0 m s<sup>-1</sup>, 14,5 m s<sup>-1</sup>, 15,0 m s<sup>-1</sup>), de totale hoeveelheid door de wind geërodeerd bodemmateriaal te begroten.



**Figuur 14.** De balans waarop de bodemchaal werd geplaatst. Rondom de balans werd schuurpapier met dezelfde oppervlakteruwheid als een onbedekte bodem aangebracht

Het massatransport  $Q$  (g m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) is de massa sediment  $M$  (g) dat zich per tijdseenheid verplaatst doorheen een dwarse sectie boven het bodemoppervlak met eenheidsbreedte. Het massatransport bij de balansmethode werd dus berekend als:

$$Q = \frac{M}{tB} \quad (7)$$

waarbij  $M$  het verschil in massa van de bodemchaal is voor en na de proef (g),  $B$  de breedte van de pan (0,20 m) en  $t$  de duur van de proef (180 seconden).

In Tabel 4 zijn de massatransporten voor de verschillende bodemstalen bij de verschillende snelheden weergegeven.

**Tabel 4.** Massatransport Q van de bodemstalen bij verschillende windsnelheden

Textuurklasse	Massatransport Q (g m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) bij een gegeven windsnelheid (m s <sup>-1</sup> )								
	11 m s <sup>-1</sup>	11.5 m s <sup>-1</sup>	12 m s <sup>-1</sup>	12.5 m s <sup>-1</sup>	13 m s <sup>-1</sup>	13.5 m s <sup>-1</sup>	14 m s <sup>-1</sup>	14.5 m s <sup>-1</sup>	15 m s <sup>-1</sup>
1. Klei (E)	0,00	0,00	0,40	0,51	0,54	0,73	2,04	2,86	3,19
2. Lemig zand (S)	0,19	0,52	0,56	2,05	3,28	3,80	4,04	4,70	5,67
3. Zandleem (L)	0,10	0,14	0,20	0,35	0,39	0,51	1,24	1,70	2,06
4. Licht zandleem (P)	0,00	0,00	0,07	0,15	0,21	0,31	0,76	1,25	1,83
5. Zand (Z)	0,21	0,44	0,63	1,93	3,16	3,69	4,67	5,15	5,88
6. Zandleem (L)	0,00	0,00	0,06	0,16	0,20	0,24	0,56	0,87	1,14
7. Klei (E)	0,00	0,09	0,33	0,50	0,74	0,86	1,14	1,50	1,70
8. Zware Klei (U)	0,00	0,00	0,06	0,29	0,60	0,67	0,99	1,43	1,87
9. Licht zandleem (P)	0,07	0,17	0,33	0,38	0,67	1,11	1,59	2,62	3,13
10. Lemig zand (S)	0,09	0,29	0,37	0,71	1,42	2,45	2,92	3,53	4,01
11. Zware Klei (U)	0,49	0,85	1,21	1,65	1,98	2,21	2,62	3,67	4,56
12. Duinzand	0,51	0,89	1,40	2,34	5,48	6,97	7,44	8,96	12,52
13. Leem (A)	0,03	0,05	0,18	0,33	0,48	0,70	0,86	1,21	1,61

#### 4.1.1.3 Bepaling van de bodemerodibiliteitsindex I

Voor de bepaling van de bodemerodibiliteitsindex werd in eerste instantie gebruik gemaakt van het totale massatransport per textuurklasse van alle onderzochte snelheden. Indien er meerdere bodemstalen waren per textuurklasse, werd het gemiddelde massatransport genomen van alle bodemstalen binnen dezelfde textuurklasse.

Aan de hand van vele experimenten heeft Chepil (1942) vastgesteld dat de meest erosiegevoelige textuurklasse, met name duinzand, een bodemerodibiliteitsindex van 695 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> heeft. Deze referentiewaarde werd eveneens voor Vlaanderen gegeven aan duinzand. Aan de hand van de relatieve verhouding van het massatransport van elke textuurklasse ten opzichte van het massatransport van duinzand, werd van elke textuurklasse de bodemerodibiliteitsfactor bepaald (Tabel 5):

$$I_i = 695 \frac{Q_i}{Q_D} \quad (8)$$

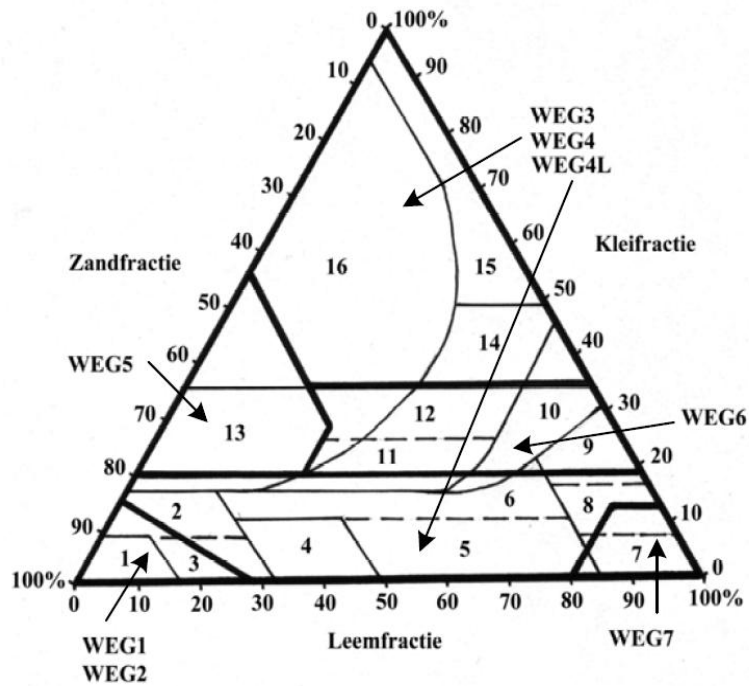
met  $I_t$  de bodemerodibiliteitsindex van de textuurklasse  $i$  ( $\text{ton ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ ), 695 de bodemerodibiliteitsindex van duinzand ( $\text{ton ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ ),  $Q_i$  het totale massatransport van textuurklasse  $i$  ( $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $Q_D$  het totale massatransport van duinzand ( $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

**Tabel 5.** De bodemerodibiliteitsfactor  $I$  van de textuurklassen in Vlaanderen

<b>Textuurklasse</b>	<b>Bodemerodibiliteitsfactor <math>I</math> (<math>\text{ton ha}^{-1} \text{jr}^{-1}</math>)</b>
Duinzand	695
Zware Klei (U)	188
Klei (E)	128
Leem (A)	82
Zandleem (L)	74
Licht zandleem (P)	110
Lemig zand (S)	304
Zand (Z)	384

#### 4.1.1.4 Toetsing van de berekende erodibiliteitsindexen

Naar analogie met Klik (2004) maakte Deleu (2005) voor de bepaling van de erodibiliteitsfactor van Belgische bodems gebruik van Tabel 2 en relateerde de verschillende WEGs aan textuurwaarden. Dit superponeerde zij op de Belgische textuurdriehoek. De erodibiliteitsklasse die dan overeenkomt met een specifieke textuurklasse, werd berekend als het gewogen gemiddelde van de erodibiliteitsfactor van de per klasse voorkomende erodibiliteitsgroepen. Zowel Klik (2004) als Deleu (2005) namen echter de waarden voor de USDA-textuurklasse 'silty clay loam' niet in rekening. Bovendien brachten beide auteurs de USDA-textuurklassen 'loam' en 'silt loam' onder in de WEG-groep 4L i.p.v. de WEG-groep 5. Dit resulteerde in een sterke overschatting van de erodibiliteit voor de Belgische textuurklassen zandleem (L) en leem (A). In de voorliggende studie werd  $I$  daarom herberekend voor de Belgische textuurklassen (Tabel 6). Figuur 15 geeft de Belgische textuurdriehoek ingedeeld in WEGs volgens de herklassering weer.



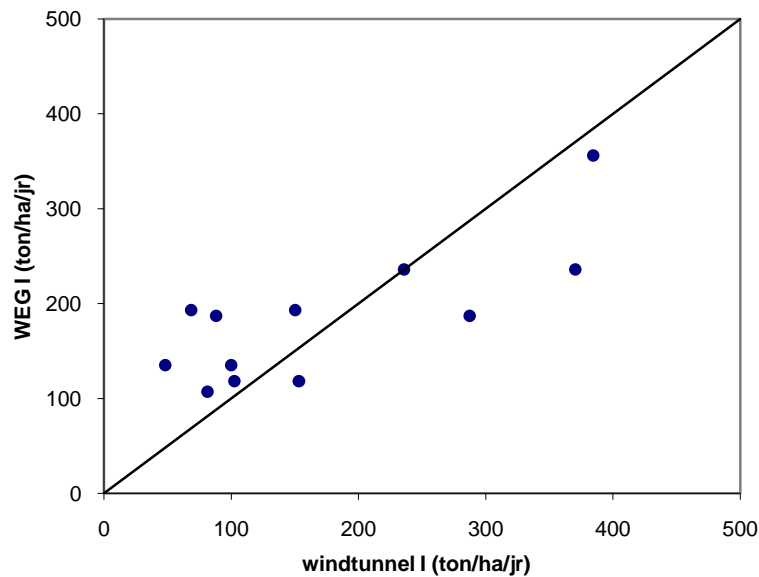
**Figuur 15.** De Belgische textuurdriehoek ingedeeld in WEGs

**Tabel 6.** De erodibiliteitsfactor van de Belgische hoofdtextuurklassen aan de hand van winderodibiliteitsgroepen

Textuurklasse	WEG (ton ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> )
Duinzand	695
Zware Klei (U)	187
Klei (E)	118
Leem (A)	107
Zandleem (L)	135
Licht zandleem (P)	193
Lemig zand (S)	236
Zand (Z)	356

In Figuur 16 wordt de erodibiliteit bepaald op basis van windtunnelmetingen (zie Tabel 4) uitgezet t.o.v. erodibiliteit geschat via de WEGs (Tabel 5). Er blijkt een redelijke overeenkomst te bestaan tussen beide methoden ( $r = 0,78$ ). In het verdere verloop van de studie wordt verder gewerkt met de *I*-waarden bekomen met behulp van de windtunnelmetingen.



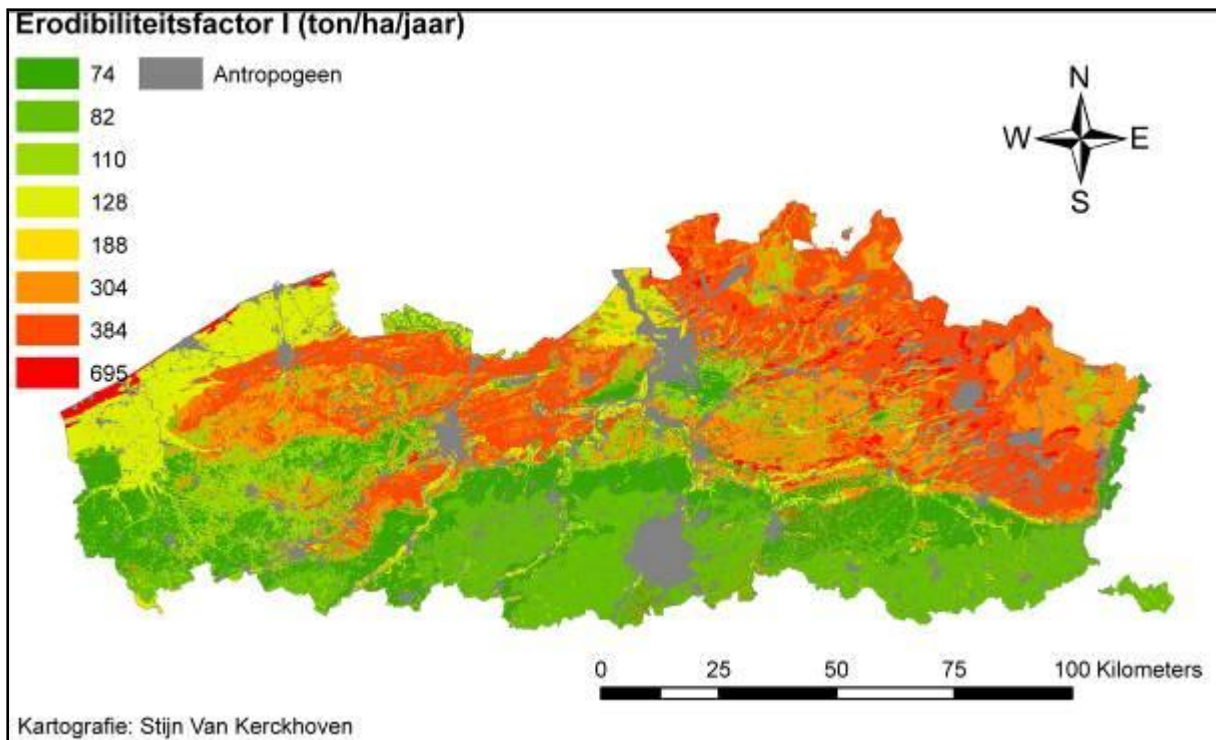


**Figuur 16.** Erodibiliteit berekend op basis van windtunnelmetingen vs. erodibiliteit geschat via WEGs

#### 4.1.1.5 Cartografische voorstelling van de bodmerodibiliteitsindex

De vectoriële bodemkaart van Vlaanderen (AGIV) wordt via een herklassering omgezet naar een vectoriële bodmerodibiliteitskaart van Vlaanderen. Hierbij worden de hoofdtextuurklassen van de bodemkaart vervangen door de bodmerodibiliteitsfactoren berekend aan de hand van de windtunnelexperimenten (Tabel 5). Voor de Polders op de bodemkaart is klei als textuur aangenomen.

De erodibiliteitskaart van Vlaanderen (Figuur 17) vertoont een duidelijk patroon qua erosiegevoeligheid van de bodem. De meer zandige bodems van het noordelijke gedeelte van Vlaanderen en het kustgebied zijn duidelijk erosiegevoeliger dan het zuidelijke gedeelte. In deze gebieden zijn met name meer de zandleem- en de leembodems aanwezig. De meest stuifgevoelige fractie is immers de fractie met een diameter tussen 80 en 100  $\mu\text{m}$  (zie 2.4.2.1.). De Polders vertonen een intermediaire erodibiliteit. De grijze gebieden in Figuur 17 duiden op antropogene gebieden. Dit zijn gebieden waar de natuurlijke bodemstructuur gewijzigd is door bebouwing of andere menselijke ingrepen.



**Figuur 17.** De bodmerodibiliteitskaart van Vlaanderen (op basis van de bodemkaart van Vlaanderen - AGIV)

#### 4.1.2 Rugruwheidsfactor $K$

De rugruwheidsfactor  $K$  geeft de ruwheid van het bodemoppervlak weer (Woodruff en Sid-doway, 1965).  $K$  is een dimensieloos getal tussen 0 en 1 en is een maat voor de reductie van erosie door de aanwezigheid van ruggen. Armbrust et al. (1964) stelden een curve op die de rugruwheidsfactor  $K$  weergeeft in functie van de werkelijke rugruwheid  $Kr$ . Later fitten Williams et al. (1984) vergelijkingen aan deze curve zodat de rugruwheidsfactor als volgt berekend wordt:

$$K = 1 \quad Kr < 2,27 \quad (9)$$

$$K = 1,125 - 0,153 \ln(Kr) \quad 2,27 \leq Kr < 89 \quad (10)$$

$$K = 0,336 \exp(0,00324Kr) \quad Kr \geq 89 \quad (11)$$

$$\text{waarbij } K_r = \frac{4HR^2}{IR} \quad (12)$$

met  $HR$  de hoogte van de ruggen (mm) en  $IR$  de afstand tussen de ruggen (mm) weergeeft.

De waarden van  $K_r$  in WEQ komen overeen met de bodemruwheidswaarden ( $SR$ ) die in RUSLE gebruikt worden om de  $C$ -factor (de gewas- en beheersingsfactor) te schatten (NRCS, 1997). Verbist et al. (2004) hebben deze bodemruwheidswaarden voor verscheidene gewassen van de gewasrotatiedatabank van Vlaanderen geschat. Zij hebben zich gebaseerd op de bodemruwheid van het oppervlak die ontstaat door het gebruik van bodembewerkingsmachines bij het ploegen en klaarleggen van het zaaibed. Wegens de uiteenlopende bewerkingswijzen voor de verschillende gewassen in Vlaanderen, hebben Verbist et al. (2004) een veralgemening doorgevoerd. Zij hebben voor Vlaanderen drie verschillende typen van bewerkingen geselecteerd. Zo werd bij het klaarleggen van het zaaibed voor de inzaai van wintertarwe de ruwheid van het bodemoppervlak na bewerking ingesteld op 10,2 mm, voor suikerbieten werd de initiële bodemruwheid ingesteld op een lagere ruwheid, met name 7,6 mm, terwijl voor een aantal andere (groenten)gewassen de bodemruwheid ingesteld werd op de allerlaagste waarde, met name 6,1 mm. Verbist et al. (2004) hebben zich voor deze waarden gebaseerd op de handleiding van de Revised Universal Soil Loss Equation (Renard et al., 1998). Voor de specifieke rugteelten, aardappelen en wortelen is er nog een vierde klasse ingevoerd met een bodemruwheid van 20,8 mm. Deze waarde is gebaseerd op de ruwheidswaarde die een bodembewerkingsmachine om ruggen te maken, creëert (NRCS, 2003).

De bekomen teeltspecifieke  $K_r$ -waarden liggen voor Vlaanderen allemaal tussen 2,27 en 89. Voor elke teelt kon dan de rugruwheidsfactor  $K$  via vergelijking 9 worden berekend (Tabel 7). De landbouwpercelen krijgen nu een  $K$ -waarde toegewezen op basis van het erop geteelde gewas. Wanneer er over meerdere jaren gekeken wordt, is  $K$  gelijk aan het gemiddelde van de verschillende jaren.

**Tabel 7.** De bodemruwheid (Verbist et al., 2004) en de berekende rugruwheidsfactor van verscheidene teelten in Vlaanderen

Teelt	Bodemruwheid $K_r$ (mm)	Rugruwheidsfactor $K$
ajuin	6,1	0,85
ajuiden	6,1	0,85
groenten voor de industrie	6,1	0,85
groenten voor vers gebruik	6,1	0,85
vollegroend groenten (uitgezonderd erwte)	6,1	0,85
witlof	6,1	0,85
aardbeien	7,6	0,81
ander vlinderbloemig gewas	7,6	0,81
braak	7,6	0,81
cichorei	7,6	0,81

fruit(struiken + aardbeien)	7,6	0,81
fruitstruiken	7,6	0,81
gras	7,6	0,81
gras (permanent)	7,6	0,81
gras (tijdelijk)	7,6	0,81
grassen	7,6	0,81
graszaad	7,6	0,81
graszoden	7,6	0,81
luzerne	7,6	0,81
permanent grasland minstens 1 maal begr	7,6	0,81
permanent grasland nt begraasd (maaïen/	7,6	0,81
suikerbieten	7,6	0,81
tijdelijk grasland minstens 1 maal begr	7,6	0,81
tijdelijk grasland nt begraasd (maaïen/	7,6	0,81
vezelvas	7,6	0,81
vlinderbloemigen	7,6	0,81
voederbieten	7,6	0,81
voederkool (bladkool)	7,6	0,81
winterbedekking/groenbemester	7,6	0,81
andere granen	10,2	0,77
boekweit	10,2	0,77
erwten, andere dan droog geoogst	10,2	0,77
erwten/bonen droge peulvruchten	10,2	0,77
erwten/bonen voor industrie	10,2	0,77
erwten/bonen voor vers gebruik	10,2	0,77
haver	10,2	0,77
korrelmais	10,2	0,77
mais	10,2	0,77
rogge	10,2	0,77
silomais	10,2	0,77
sojabonen	10,2	0,77
spelt	10,2	0,77
stambonen	10,2	0,77
triticale	10,2	0,77
tuin- en veldbonen, andere dan droog ge	10,2	0,77
wintergerst	10,2	0,77
winterkoolzaad	10,2	0,77
winterrogge	10,2	0,77
wintertarwe	10,2	0,77
zomergerst	10,2	0,77
zomerrogge	10,2	0,77
zomertarwe	10,2	0,77
aardappelen	20,2	0,66
voederwortelen	20,2	0,66
wortelen industrie	20,2	0,66
wortelen vers gebruik	20,2	0,66

### 4.1.3 Klimaatfactor C

#### 4.1.3.1 Bepaling van de klimaatsfactor C

Winderosiviteit is een maat voor het vermogen van de wind om omstandigheden te creëren die winderosie bevorderen. Om de winderosiviteit in WEQ in te bouwen, stelden Chepil et al. (1962) een klimaatsfactor  $C$  op die toelaat het gemiddelde jaarlijkse bodemverlies te schatten voor klimaten die verschillen van het klimaat waarbij WEQ opgesteld werd, met name dat van Garden City KS, USA. De klimaatsfactor voor eender welke locatie wordt uitgedrukt als een percentage van de  $C$ -factor voor Garden City, die een waarde van 100 heeft. Al naar gelang het klimaat op een bepaalde locatie resulteert in hoger of lager bodemverlies in vergelijking met Garden City, is de  $C$ -factor op die locatie respectievelijk hoger of lager dan 100.

Om de klimaatsfactor  $C$  te bepalen, zijn verschillende methoden mogelijk. Bij elk van deze methoden is de  $C$ -factor gerelateerd aan de bodemvochtigheid en de gemiddelde windsnelheid. Deleu (2005) vond voor Vlaanderen voor de verschillende methoden gelijkaardige waarden voor  $C$ . Bovendien vonden Cornelis et al. (2004a) een zeer goede overeenkomst tussen Chepils meetresultaten waarop de klimaatsfactor is gebaseerd en hun eigen wind-tunnelresultaten rond de invloed van de vochtigheid van de bodem. In dit opzicht wordt dus voor Vlaanderen best geopteerd voor de methode van Chepil (1962):

$$C = 386 \frac{u^3}{PE^2} \quad (13)$$

met  $C$  de klimaatsfactor (%),  $u$  de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $PE$  de Thornthwaite neerslag-evaporatie index (Thornthwaite, 1931), 386 de factor die de klimaatscondities voor Garden City, Kansas weergeeft. Om de klimaatsfactor in WEQ toe te passen om het bodemverlies te berekenen, moet de klimaatsfactor door 100 gedeeld worden.

De windsnelheidsterm van de klimaatsfactor is gebaseerd op het feit dat bodemverplaatsing evenredig is met de derde macht van de windsnelheid. Onderzoekers rapporteerden dat wanneer de windsnelheid groter is dan de kritische windsnelheid, de bodemflux evenredig is met de derde macht van de sleepsnelheid, die op zijn beurt gerelateerd is aan de derde macht van de windsnelheid (o.a. Bagnold, 1941; Chepil, 1945a; Cornelis en Gabriels, 2004).

De term die het aandeel van de bodemvochtigheid weergeeft, gaat uit van het feit dat de bodemverplaatsing omgekeerd evenredig is met het equivalent vochtgehalte van de bodem (Chepil, 1956). Hierbij werd verondersteld dat dit laatste gelijk is aan de Thornthwaite precipitation effectiveness index ( $PE$ ) (Thornthwaite, 1931):

$$PE = 3,16 \sum \left( \frac{P_i}{1.8T_i + 22} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (14)$$

met  $PE$  de Thornthwaite neerslag-evaporatie-index,  $P_i$  de maandelijkse neerslag (mm),  $T_i$  de gemiddelde maandelijkse temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

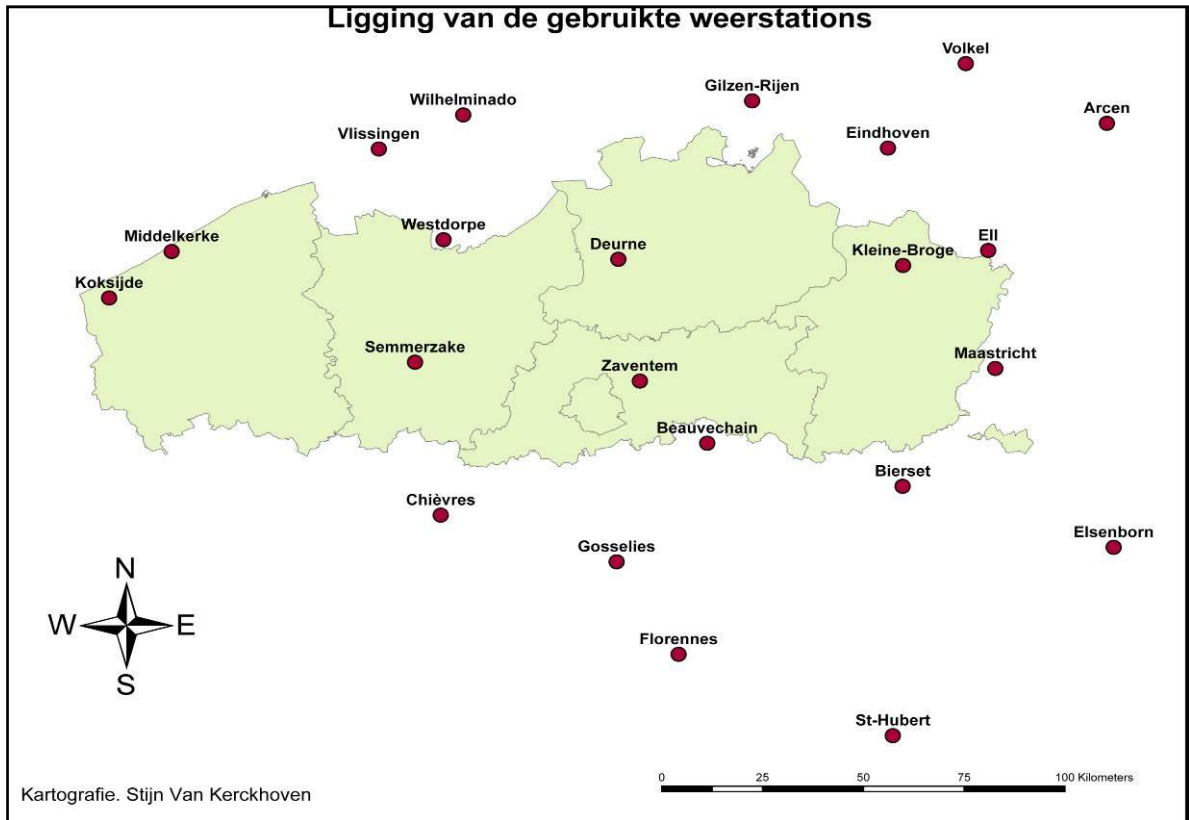
#### 4.1.3.2 Cartografische voorstelling van de klimaatsfactor voor Vlaanderen

De benodigde klimaatgegevens voor de methode van Chepil (1962), met name de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid, de maandelijkse gemiddelde temperatuur en de maandelijkse neerslaghoeveelheid zijn voor het hele grondgebied Vlaanderen bepaald aan de hand van 21 verschillende meetstations, gelegen in zowel Vlaanderen en Wallonië als het zuiden van Nederland (Tabel 8, Figuur 18). De gegevens werden aangeleverd door het KMI en het KMNI.

De omgekeerde afstands-interpolatiemethode werd toegepast om de meetwaarden (puntwaarden) van alle parameters van vergelijking 17 en 18 om te zetten in rasterkaarten die voor Vlaanderen volledig gebiedsdekkend zijn (Figuur 19, Figuur 20, Figuur 21). Bij deze methode wordt de waarde van een onbemonsterd punt geschat aan de hand van gewogen gemiddelden van de geobserveerde punten. Het gewicht dat toegekend werd aan de bemonsterde punten is omgekeerd evenredig met de afstand tot het onbemonsterd punt tot de tweede macht.

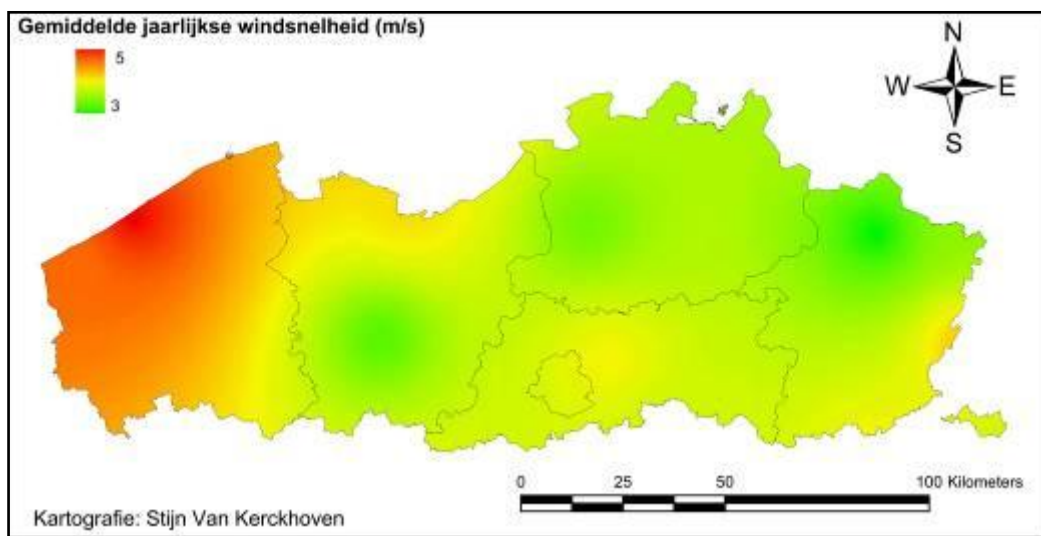
**Tabel 8:** De ligging van de gebruikte weerstations in Lambert-72 coördinaten

<b>Weerstation</b>	<b>X Lambert (m)</b>	<b>Y Lambert (m)</b>	<b>Meetperiode</b>
Beauvechain	178020	159436	1992-2001
Bierset	226460	147928	1992-2001
Chièvres	111909	140217	1994-1998
Deurne	155947	208591	1992-2001
Elsenborn	278829	131612	1992-2001
Florennes	170910	103012	1992-2001
Gosselies	155527	127754	1992-2001
Kleine-Brogel	226572	206958	1992-2001
Koksijde	29623	198268	1992-2001
Middelkerke	45138	210698	1997-2005
St-Hubert	224047	81302	1992-2001
Semmerzake	105507	181088	1997-2005
Zaventem	161300	176059	1992-2001
Arcen	277161	244951	1991-2008
Eindhoven	222850	238333	1991-2008
Eil	247703	210954	1995-2008
Gilzen-Rijen	189151	250948	1991-2008
Maastricht	249467	179431	1991-2008
Vlissingen	96555	238094	1991-2008
Volkel	242146	260899	1991-2008
Westdorpe	112603	213846	2000-2008
Wilhelminadorp	117470	247193	1991-2008



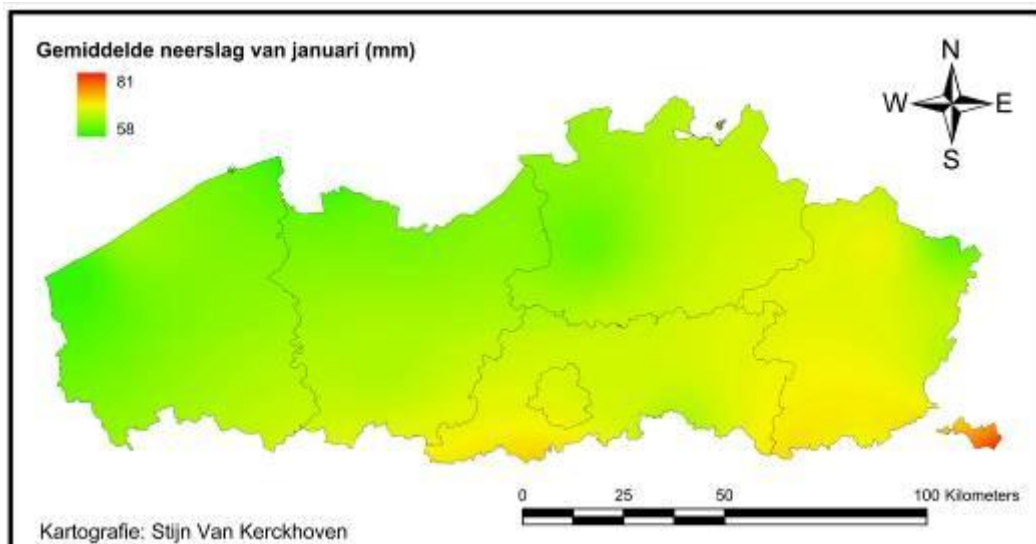
**Figuur 18.** De ligging van de gebruikte weerstations

De meetpunten gelegen in Wallonië en zuidelijk Nederland, zorgen ervoor dat de interpolatie van de parameters over de grenzen van Vlaanderen heen gebeurt. Hierdoor zullen de randverschijnselen van de interpolatie buiten het Vlaamse gebied vallen waardoor ook de grensregio's van Vlaanderen betrouwbare interpolatiewaarden hebben.

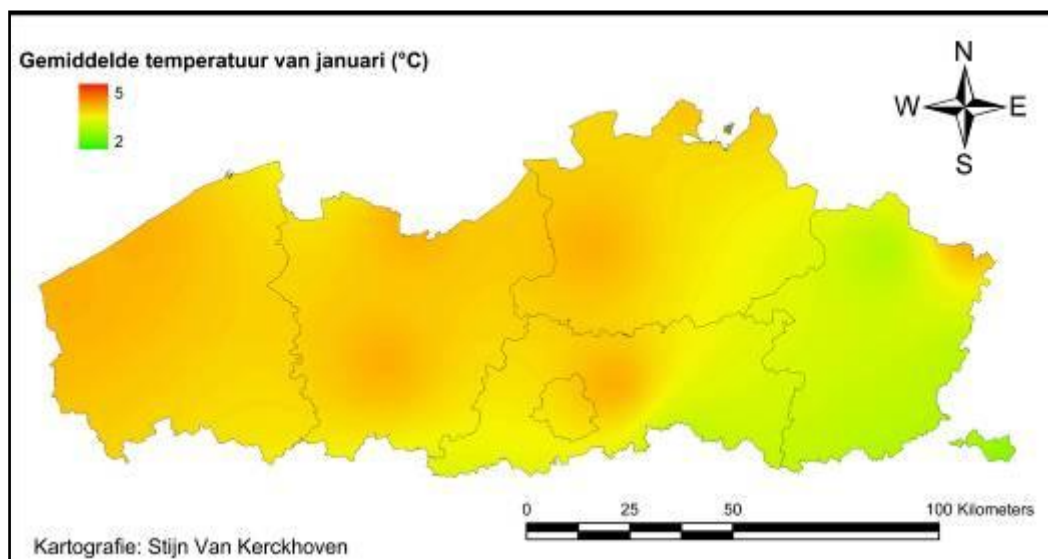


**Figuur 19.** Gemiddelde jaarlijkse windsnelheid in Vlaanderen



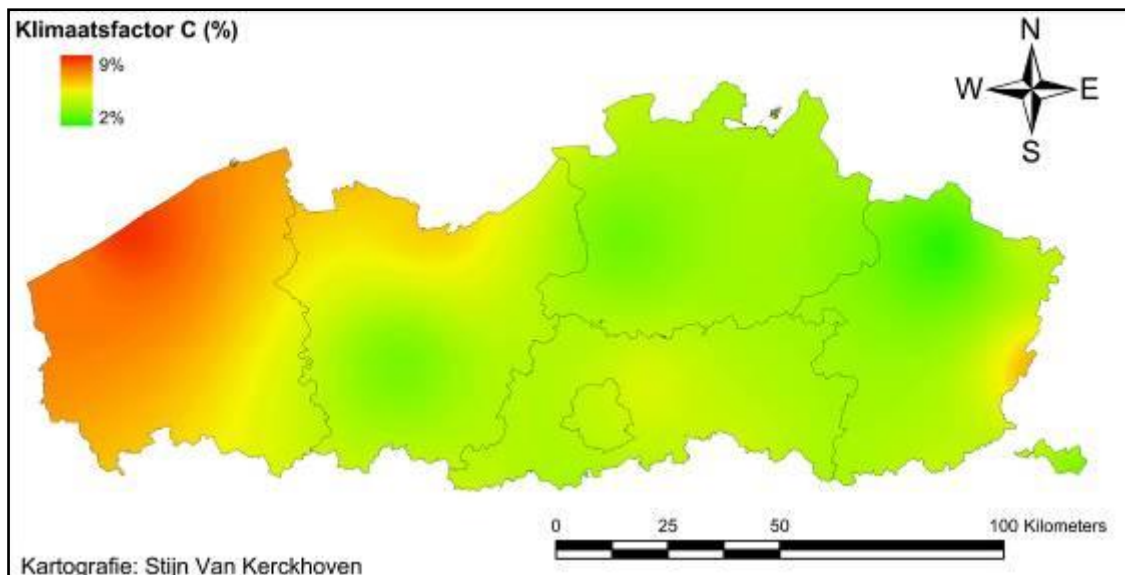


**Figuur 20.** De gemiddelde neerslag in Vlaanderen voor de maand januari



**Figuur 21.** De gemiddelde temperatuur in Vlaanderen voor de maand januari

De bekomen rasterkaarten voor de jaarlijkse windsnelheid, de maandelijkse temperatuur en de maandelijkse neerslaghoeveelheid werden gecombineerd conform de vergelijkingen 17 en 18. Het eindresultaat is een gebiedsdekkende rasterkaart van de klimaatsfactor C voor Vlaanderen (Figuur 22).



**Figuur 22.** De WEQ-klimaatsfactor C voor Vlaanderen

In Vlaanderen varieert de klimaatsfactor tussen 2 en 9 % ten opzichte van de referentiewaarde in Garden City, Kansas. In een gelijkaardige studie in het noordoosten van Oostenrijk (Klik, 2004) werden gelijkaardige waarden gevonden als in Vlaanderen, namelijk tussen 5 en 8%.

De hogere klimaatsfactor aan de kust is vooral te wijten aan de hogere windsnelheden in de kustgebieden dan in het binnenland (Figuur 19). De andere klimaatsparameters variëren minder nadrukkelijk, waardoor zij dan ook minder effect hebben op de ruimtelijke variabiliteit van de klimaatsfactor.

#### 4.1.4 Veldlengte $L$

Chepil (1957) definieerde de veldlengte  $L$  als de werkelijke onbeschutte lengte van het veld langs de overheersende windrichting. Op een onbeschermde aan erosie onderhevig veld is de hoeveelheid verplaatst bodemmateriaal gelijk aan nul aan de windopwaartse zijde van het veld. Naarmate de afstand windafwaarts toeneemt, stijgt de hoeveelheid geërodeerd materiaal. Bij grote velden kan het voorkomen dat het bodemtransport op een bepaalde afstand de maximumcapaciteit van de wind bereikt. Voorbij dit punt is de hoeveelheid bodemmateriaal dat door de wind vervoerd wordt constant. De afstand waarbij de maximale transportcapaciteit voorkomt, is afhankelijk van de erodibiliteit van de bodem. Deze afstand is kleiner bij bodems gevoeliger aan erosie (Chepil, 1959).

Doordat de percelen op de gewasrotatiekaart voorgesteld worden als polygonen laat een GIS-toepassing niet toe automatisch de veldlengte van de percelen te bepalen. Van polygonen kan alleen maar een lengte gemeten worden door handmatig van de ene naar de andere kant van een polygoon een lijn te trekken en dan hiervan de afstand te bepalen. Dit is gelet op het hoge aantal percelen in Vlaanderen niet mogelijk voor dit project. In GIS is het daarentegen wel mogelijk om de perimeter van een veld te berekenen. Hieruit kan, indien er wordt uitgegaan van vierkante percelen, een schatting gemaakt worden voor de veldlengte:

$$L' = \sqrt{2 \left( \frac{P}{4} \right)^2} \quad (15)$$

met  $L'$  de reële veldlengte en  $P$  de perimeter

Deze waarde voor de veldlengte zal niet overeenkomen met de werkelijke veldlengte, maar zal ze toch benaderen. Via deze methode komen we voor Vlaanderen uit op een gemiddelde lengte van 193 meter. De hogere waarde lijkt een overschatting van de gemiddelde veldlengte in Vlaanderen. Dit hoger gemiddelde is echter niet het gevolg van de schatting van de veldlengte maar is inherent verbonden aan de gewasrotatiekaart waar er enkele zeer grote percelen gekarteerd zijn die de gemiddelde veldlengte omhoog trekken.

De aanwezigheid van een windscherm op het veld heeft een invloed op de veldlengte. Deze invloed wordt in rekening gebracht door de beschutte veldlengte  $L_s$ , die bepaald wordt aan de hand van:

$$L_s = 10 H \quad (16)$$

met  $L_s$  de beschutte veldlengte (m) en  $H$  de hoogte van het windscherm (m).

In deze studie werd de aan- of afwezigheid van windschermen op een perceel afgeleid van de Biologische Waarderingskaart (Wils et al., 2004). Hierop wordt weergegeven waar windschermen (opstaande kleine landschapselementen) voorkomen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen bomenrijen, oude heggen en houtwallen. Omdat er over de hoogte van deze windschermen geen informatie beschikbaar was, werd de hoogte van de bomenrijen gelijk gesteld aan 5 meter en die van de oude heggen en houtwallen aan 2 meter. Bossen resulteren in een zelfde schermhoogte als een enkele bodemrij.

De resulterende veldlengte is gelijk aan de veldlengte verminderd met de beschutte veldlengte:

$$L = L' - L_s \quad (17)$$

#### 4.1.5 Vegetatiefactor $V$

##### 4.1.5.1 Bepaling van de vegetatiefactor $V$

Vegetatie vormt een remmende factor op de erosieve werking van de wind. Siddoway et al. (1965) stelden regressievergelijkingen op die het bodemverlies door de wind relateerden aan de hoeveelheid, de soort en de oriëntatie van de vegetatie. Deze vergelijkingen leidden tot de conclusie dat hoe fijner en meer opstaand het residu is, hoe effectiever het zal zijn om winderosie te reduceren. Deze studies hebben geleid tot de vegetatiefactor opgesteld door Woodruff & Siddoway (1965). De vegetatiefactor drukt de soort, de hoeveelheid en de oriëntatie van de vegetatie uit in platliggend-graangewas-equivalenten  $SG_e$ . Deze referentietoestand wordt gedefinieerd als platliggende lange (25,4 cm) graanstengels, parallel gelegen aan de windrichting. De rijen staan loodrecht op de windrichting op een afstand van 25,4 cm van elkaar. De relatie tussen de vegetatieve bedekking en de equivalente bedekking door platliggend graangewas is (Williams et al., 1984):

$$V = 0.2533 SG_e^{1.363} \quad (18)$$

met  $V$  de vegetatiefactor ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) en  $SG_e$  het platliggend-graangewas-equivalent ( $\text{ton ha}^{-1}$ ).

Voor een bepaald gewas kan  $SG_e$  berekend worden door (Armbrust & Lyles, 1985):

$$SG_e = a R_w^b \quad (19)$$

met  $a$  en  $b$  gewasspecifieke constanten, en  $R_w$  de droge massa van het bovengrondse deel van het gewas ( $\text{ton ha}^{-1}$ ). De gewasspecifieke constanten gebruikt in deze studie zijn afkomstig uit de National Agronomy Manual (NRCS, 2003) (Appendix A). De gewassen waarvoor  $a$  en  $b$  niet uit de National Agronomy Manual konden afgeleid worden werden niet verder betrokken bij de berekening van het actuele winderosierisico.

Omdat enkel de droge massa van het bovengrondse deel van het gewas bij de oogst ( $R_{w\_oogst}$ , Tabel 9) gekend is (Salomez J., 2008, persoonlijke communicatie) en deze droge massa varieert tijdens het groeiproces, werd een vegetatieomzettingsfactor ( $V_H$ ) berekend (Tabel 9).  $V_H$  werd bepaald op basis van de evolutie van de hoogte van het gewas tijdens zijn groeiproces. Hierbij werd verondersteld dat de droge stofmassa van een gewas evenredig mee verandert met de hoogte van het bovengrondse deel van de gewas.  $V_H$  zet dus de droge massa op het tijdstip van de oogst om naar een gewogen gemiddelde droge massa tijdens het groeiproces:

$$R_w = V_H R_{w\_oogst} \quad (20)$$

De vegetatiefactor  $V$  werd hier berekend aan de hand van het gewogen gemiddelde  $SG_e$  over drie jaar (2000-2002) van de gewasrotatiekaart. De  $SG_e$  van de nateelten werden opgedeeld in twee groepen. Wanneer er geen teelt is, werd het perceel als braak beschouwd en was  $SG_e$  gelijk aan nul. Wanneer wel een gewas geteeld wordt, dan werd de  $SG_e$  van gras genomen. Er werd hier geopteerd voor gras omdat dit gewas de meest conservatieve is van alle tussengewassen en omdat de groepen van de tussengewassen veel te ruim zijn waardoor een meer specifieke gewasbepaling onmogelijk is.

$SG_e$  werd per jaar berekend als:

$$SG_e = \frac{T_{hoofdteelt} SG_{e\_hoofdteelt} + T_{nateelt} SG_{e\_nateelt}}{365} \quad (21)$$

met  $SG_e$  het gewogen gemiddelde platliggend-graangewas-equivalent van een bepaald jaar ( $\text{ton ha}^{-1}$ ),  $T_{hoofdteelt}$  en  $T_{nateelt}$  de tijd dat respectievelijk de hoofdteelt en de nateelt op het perceel verbouwd zijn (dagen),  $SG_{e\_hoofdteelt}$  en  $SG_{e\_nateelt}$  de platliggend-graangewas-equivalenten van respectievelijk de hoofdteelt en de nateelt.

De uiteindelijke waarden van de vegetatiefactoren  $V$  werden per gewasrotatie van drie jaar bepaald, door in vergelijking 17 het  $SG_e$ -gemiddelde van de drie jaren in te vullen. Wanneer voor één of twee jaren van de gewasrotatie geen  $SG_e$  kon berekend worden, werd het gemiddelde genomen van de jaren waarvoor  $SG_e$  wel gekend was. Voor de meest voorkomende gewassen in Vlaanderen zijn de factoren die nodig zijn om de  $SG_e$  te berekenen in Tabel 9 opgelijst.

**Tabel 9.** De factoren  $a$ ,  $b$ ,  $R_{w\_oogst}$ ,  $V_H$  en  $R_w$  van verscheidene teelten in Vlaanderen

Teelten	$a$	$b$	$R_{w\_oogst}$ ton ha <sup>-1</sup>	$V_H$	$R_w$ ton ha <sup>-1</sup>	Tijd dagen
aardappelen	5,5686	0,8114	2,5	0,68	1,70	150
aardbeien	5,9316	0,9834	1,0	0,64	0,64	275
ajuin	1,3067	1,1157	1,0	0,70	0,70	140
ajuinen	1,3067	1,1157	1,0	0,70	0,70	140
erwten, andere dan droog geoogst	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
erwten, droog geoogst	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
erwten/bonen droge peulvruchten	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
erwten/bonen voor industrie	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
erwten/bonen voor vers gebruik	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
gras	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
gras (permanent)	0,6937	1,0140	12,0	1,00	12,00	360
gras (tijdelijk)	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
grassen	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
graszaad	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
graszoden	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
harde tarwe	1,8262	0,7912	6,5	0,15	0,98	250
korrelmais	2,6295	0,7895	8,0	0,67	5,36	150
mais	2,6295	0,7895	8,0	0,67	5,36	150
permanent grasland minstens 1 maal begraasd	0,6937	1,0140	12,0	1,00	12,00	360
permanent grasland niet begraasd (maaien/hooien)	0,6937	1,0140	12,0	1,00	12,00	360
rogge	1,8262	0,7912	4,3	0,15	0,65	250
silomais	2,6295	0,7895	8,0	0,67	5,36	150
stambonen	0,6937	1,0140	2,9	0,52	1,51	85
suikerbieten	5,5686	0,8114	4,0	0,61	2,44	170
tijdelijk grasland minstens 1 maal begraasd	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
tijdelijk grasland nt begraasd (maaien/hooien)	0,6937	1,0140	12,0	0,63	7,56	70
triticale	1,8262	0,7912	5,2	0,15	0,78	250
tuin- en veldbonen droog geoogst	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
tuin- en veldbonen, andere dan droog geoogst	0,6937	1,0140	6,3	0,52	3,28	85
voederbieten	5,5686	0,8114	4,0	0,61	2,44	170
voederkool (bladkool)	0,6937	1,0140	3,1	0,62	1,92	70
voederwortelen	1,8262	0,7912	3,1	0,74	2,29	170
wintergerst	1,8262	0,7912	5,5	0,15	0,83	250
winterrogge	1,8262	0,7912	3,6	0,15	0,54	250
wintertarwe	1,8262	0,7912	6,5	0,15	0,98	250
wortelen industrie	1,8262	0,7912	3,1	0,64	1,98	170
wortelen vers gebruik	1,8262	0,7912	3,1	0,64	1,98	170
zomergerst	1,8262	0,7912	3,8	0,51	1,94	170
zomerkool- en raapzaad	0,6937	1,0140	2,3	0,62	1,43	70
zomertarwe	1,8262	0,7912	4,7	0,51	2,40	170

#### 4.1.6 De formules van WEQ

In tegenstelling tot het RUSLE-model worden de factoren bij WEQ niet zomaar vermenigvuldigd. Zoals eerder al aangehaald bestaat WEQ uit een functionele relatie van vijf verschillende parameters ( $I$ ,  $K$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $V$ ). De volgende stappen moeten uitgevoerd worden om uiteindelijk te komen tot  $E_5$ , het gemiddeld jaarlijks actueel bodemverlies ten gevolge van wind (ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>):

$$E_1 = I \quad (22)$$

$$E_2 = I * K \quad (23)$$

$$E_3 = I * K * C \quad (24)$$

$$E_4 = (WF^{0,348} + E_3^{0,348} - E_2^{0,348})^{2,87}$$

$$WF = E_2 * \left[ 1,0 - 0,122 * \left( \frac{L}{L_0} \right)^{-0,383} * \exp \left( -3,33 * \frac{L}{L_0} \right) \right] \quad (25)$$

$$L_0 = 1.56 * 10^6 * E_2^{-1,26} * \exp(-0,00156 * E_2)$$

$$E_5 = \psi_1 * E_4^{\psi_2}$$

$$\psi_1 = \exp(-0,759 * V - 4,74 * 10^{-2} * V^2 + 2,95 * 10^{-4} * V^3) \quad (26)$$

$$\psi_2 = 1,0 + 0,893 * 10^{-2} * V + 8,51 * 10^{-3} * V^2 - 1,5 * 10^{-5} * V^3$$

met  $I$  de bodemerodibiliteitsindex (ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>),  $K$  de bodemruweheidsfactor (-),  $C$  klimaatsfactor (-),  $WF$  de veldlengtefactor,  $L$  de veldlengte (m),  $L_0$  de maximale veldlengte (m),  $V$  de vegetatiefactor (ton ha<sup>-1</sup>) en  $\psi_1$  en  $\psi_2$  constanten.

Bij het uitvoeren van deze berekeningen met de eerder bepaalde parameterwaarden, waren er problemen bij de bepaling van  $WF$  en  $E_4$ . De formules voor beide parameters konden enkel worden opgelost indien de perceelslengte niet al te klein was. Dit was echter soms wel het geval in de gewasrotatiekaart. In de gewasrotatiekaart zijn er zelfs percelen die maar een veldlengte hebben van enkele meters. Opdat de formule altijd oplosbaar zou zijn, werd ervoor geopteerd een minimale veldlengte in te voeren bij de berekeningen. Deze werd in-

gesteld op 100 m. Bij deze realistische waarde voor een minimale veldlengte konden de berekeningen altijd uitgevoerd worden. Ook werden enkel de percelen in rekening gebracht waarvoor zowel de *K*-factor als de *a*- en *b*-coëfficiënten voor de bepaling van *S*Ge, beschikbaar waren.

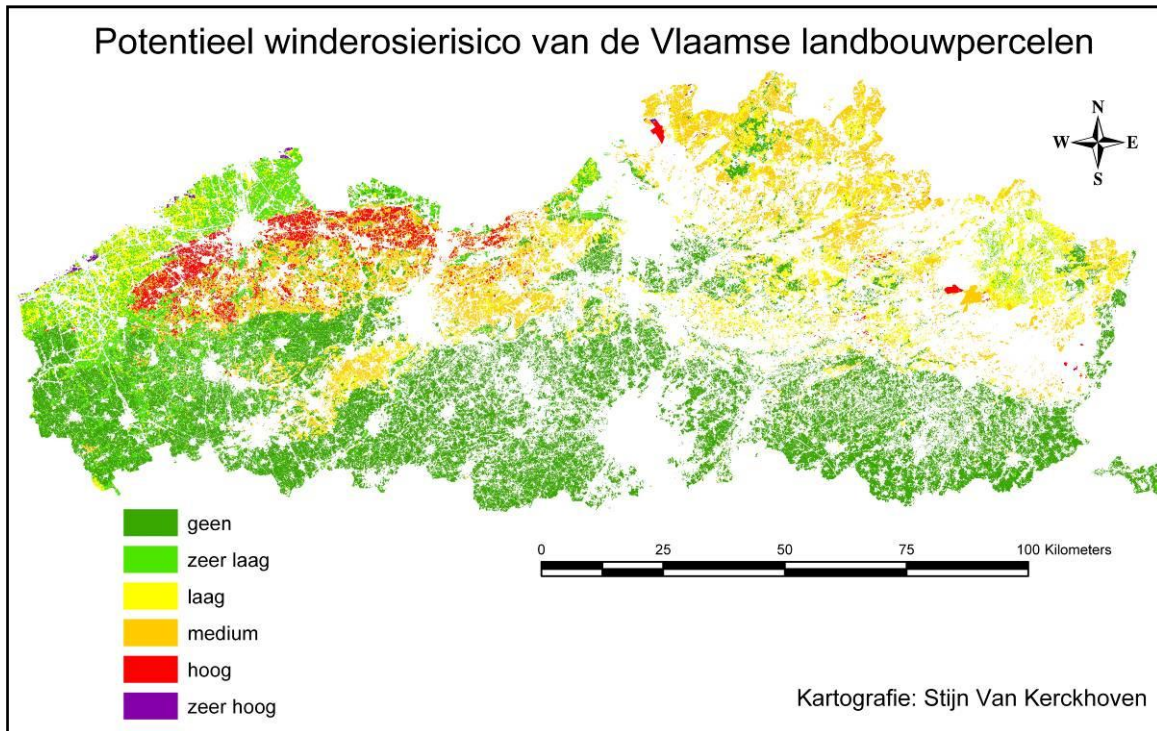
## 4.2 Opstellen van risicokaart voor winderosie in Vlaanderen

De risicokaarten worden op perceels- en gemeentelijk niveau zowel voor het potentiële als voor het actuele erosierisico opgemaakt. De erosierisicoklassen die in deze kaarten gebruikt worden, zijn afkomstig van de gemeentelijke erosiebestrijdingsplannen (AMINAL, 2001). Erosierisico werd ingedeeld in zes klassen. Voor het potentiële erosierisico zijn dit: “geen”: 0 - 2 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “zeer laag”: 2,00001 - 5 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “laag”: 5,00001 - 10 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “medium”: 10,00001 - 18 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “hoog”: 18,00001 - 30 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, en “zeer hoog”: 30,00001 - 59 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Voor het actuele erosierisico werden per klasse volgende grenzen gehanteerd: “geen”: 0 - 3 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “zeer laag”: 3,00001 - 6 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “laag”: 6,00001 - 9 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “medium”: 9,00001 - 12 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, “hoog”: 12,00001 - 15 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, en “zeer hoog”: 15,00001 - 42 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (T. Vander Elst, LNE, persoonlijke communicatie). In het licht van deze waarden kan worden opgemerkt dat een erosiewaarde van <2 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> als aanvaardbaar mag beschouwd worden. Deze waarde vertegenwoordigt wel de totaalsom van zowel water- als winderosie op een perceel (Morgan, 1995). Dit cijfer is gebaseerd op de aanname dat bodemvorming (via verwerking) verloopt aan een snelheid van maximaal 10 cm per 100 jaar, wat equivalent is aan 2 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met het mogelijk vervuilend karakter van bodemerosie (naar lucht en oppervlaktewater).

### 4.2.1 De potentiële erosierisicokaart voor winderosie in Vlaanderen

Bij de potentiële erosiekaart voor winderosie in Vlaanderen wordt geen rekening gehouden met de geteelde gewassen. De vegetatiefactor *V* wordt voor deze kaart buiten beschouwing gelaten. De potentiële winderosiekaart voor Vlaanderen wordt dus bekomen door WEQ te doorlopen tot en met stap *E*<sub>4</sub> (zie paragraaf 4.1.6). Doordat de *K*-factor afhankelijk is van het geteelde gewas wordt deze voor de potentiële erosiekaart niet in rekening gebracht en voor heel Vlaanderen gelijk gesteld aan 1. Figuur 23 geeft de potentiële winderosiegevoeligheid weer. De witte gebieden op deze kaart zijn antropogene gebieden of niet-landbouwgebieden. Zij worden dus door WEQ buiten beschouwing gelaten.



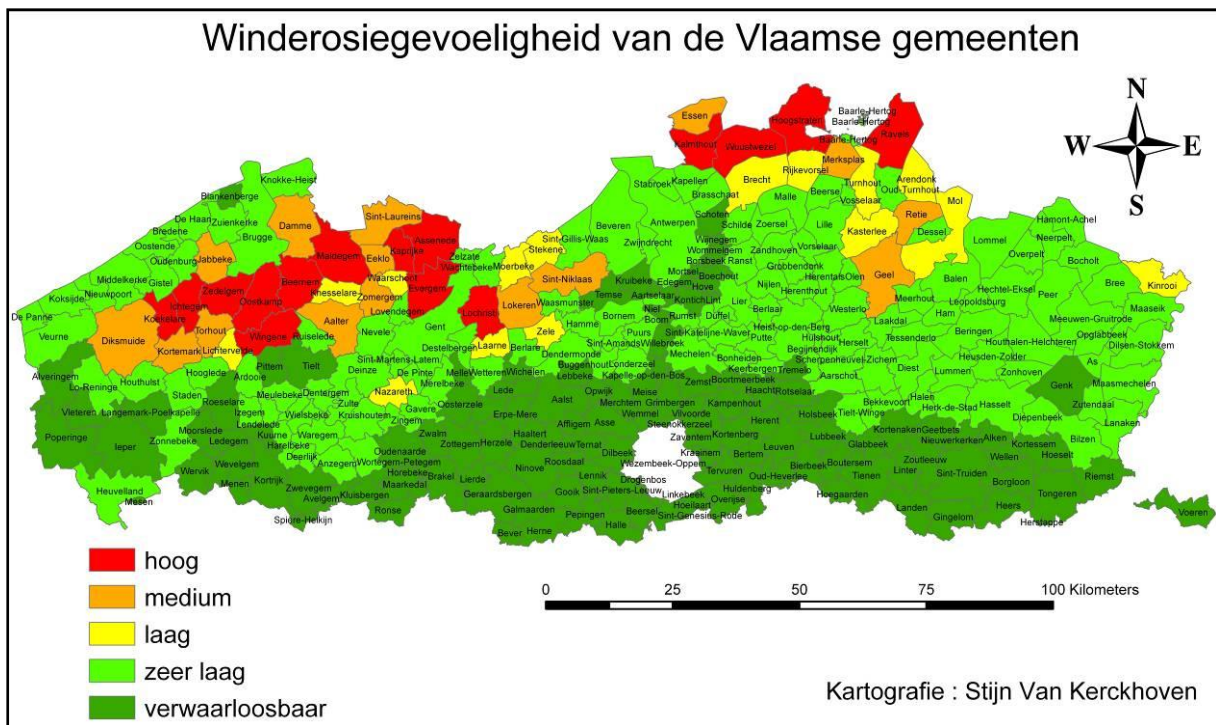


**Figuur 23.** De potentiële winderosiegevoeligheid van Vlaanderen

De hoogste waarden komen voor aan de kust, in de Vlaamse Zandstreek, en in de Antwerpse en Limburgse Kempen. Het gemiddeld potentieel bodemverlies door winderosie over heel Vlaanderen bedraagt  $4,8 \text{ ton ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . Deze bevindingen komen overeen met de vroegere aannames van Poesen et al. (1996).

Op Figuur 23 valt vooral het grote noord-zuid verschil op, met de hoge potentiële winderosiewaarden in het noorden en de lage in het zuiden. Dit verschil valt te verklaren door de ligging van de meer erosiegevoelige, zandige bodems in het noordelijke deel van Vlaanderen. De hoogste waarden aan de kust en het westelijke deel van de Vlaamse Zandstreek zijn niet enkel te verklaren door de bodems met een hoge erodibiliteitsfactor. Ook de relatief hoge klimaatsfactor in deze gebieden bepaalt het uiteindelijke verhoogde potentiële winderosierisico. In het zuidelijk deel van Vlaanderen daarentegen bepalen vooral de minder winderosiegevoelige lemige bodems de lagere erosiewaarden.

Figuur 24 geeft het potentiële winderosierisico weer op gemeentelijk niveau. Op het gemeentelijk niveau zijn dezelfde patronen waar te nemen als op het perceelsniveau. Zo is ook de noord-zuid tegenstelling duidelijk waar te nemen en komen maximale waarden voor in de Vlaamse Zandstreek en het noordelijk deel van de Kempen. De hoge erosiewaarden aan de kust zijn daarentegen wat gemilderd door de achterliggende Polders.



**Figuur 24.** De gemiddelde potentiële winderosiegevoeligheid van de Vlaamse gemeenten

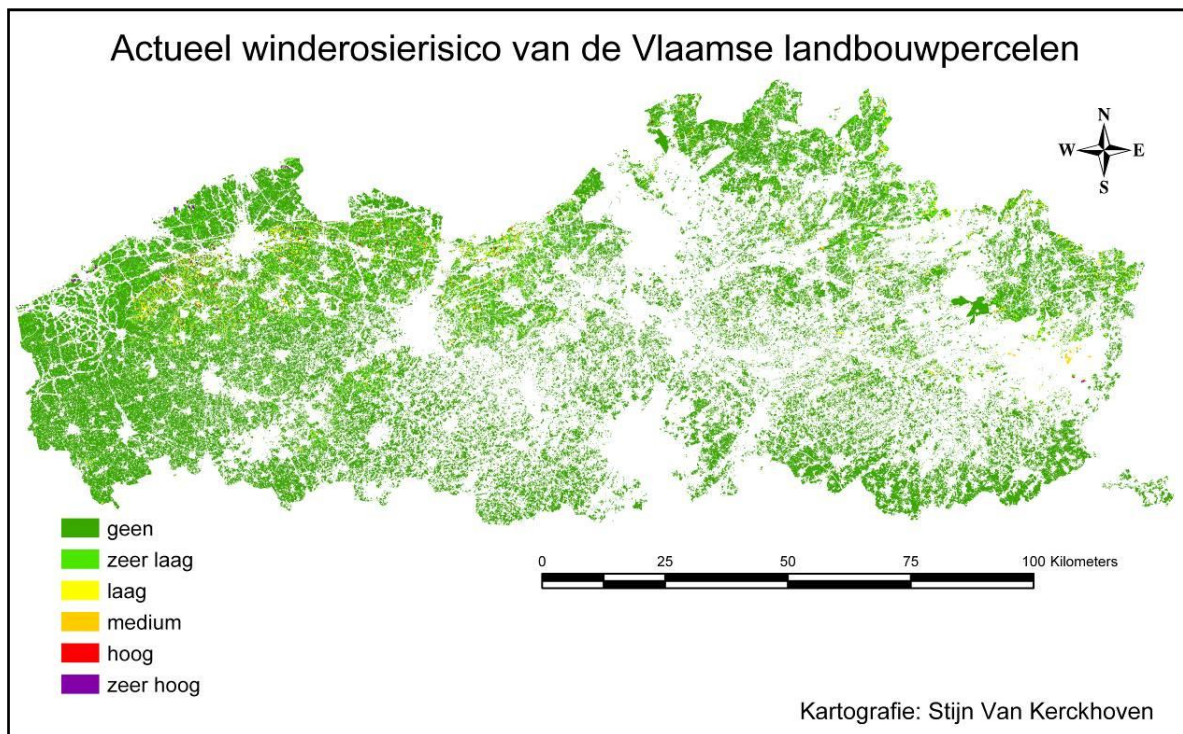
#### 4.2.2 De actuele erosierisicokaart voor winderosie in Vlaanderen

Voor de actuele winderosiekaart werd de vegetatiefactor wel in rekening gebracht en werd WEQ dus volledig doorlopen. De waarde bekomen voor  $E_5$  is gelijk aan de actuele erosiewaarde voor wind. Het uiteindelijke resultaat van deze berekeningen is weergegeven op de actuele winderosiekaart op perceelsniveau (Figuur 25).

Het actuele bodemverlies op perceelsniveau voor Vlaanderen ten gevolge van winderosie schommelt tussen 0 en  $40,9 \text{ ton ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ , met een gemiddelde van  $0,9 \text{ ton ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ .

Qua ruimtelijke verdeling van de actuele winderosierisicogebieden, zijn dezelfde patronen zichtbaar die ook al bij de potentiële kaarten naar voren kwamen. Zo blijft de noord-zuid tegenstelling zichtbaar en kan in het algemeen gesteld worden dat de zandgebieden van de Vlaamse Zandstreek en de Limburgse en Antwerpse Kempen het grootste winderosierisico van Vlaanderen hebben.

De vaststelling dat het jaarlijkse actuele bodemverlies door winderosie geschat op basis van een gemiddelde jaarlijkse klimaatsfactor laag is, neemt niet weg dat er tijdens sommige jaren tijdelijk aanzienlijke winderosie-events kunnen optreden.



**Figuur 25.** Actuele winderosiegevoeligheid van de Vlaamse percelen

### 4.3 Validatie van de risicokaart voor winderosie in Vlaanderen

Voor de validatie van de risicokaarten voor winderosie in Vlaanderen werd teruggevallen op enkele interviews met landbouwers. Een validatie aan de hand van veldexperimenten zou nauwkeuriger geweest zijn, maar hiervoor was noch tijd noch budget beschikbaar.

Aan de hand van een kort interview (appendix B) werd bij de landbouwer gepeild naar zijn kennis over winderosie en naar het feit of hij al dan niet te maken had met winderosie op zijn percelen. Indien op deze laatste vraag het antwoord positief was, werd ook gepeild naar de schade die hij hierdoor leed en naar eventuele maatregelen die hij nam om winderosie te beperken.

De antwoorden op de vraag of een landbouwer al dan niet te maken had met winderosie, werden opgedeeld in drie categorieën: wel, af en toe en geen ervaringen met winderosie (Tabel 10).

In Tabel 10 staan in de eerste drie kolommen de plaats en de coördinaten van de percelen waarover het interview ging. In de derde en de vierde kolom staan de potentiële en actuele hoeveelheden winderosie die voorspeld werden aan de hand van WEQ. De laatste kolom

geeft de ervaring van de landbouwer met winderosie weer. Als de voorspelde hoeveelheden winderosie, zowel actuele als potentiële, vergeleken worden met de ervaring van de landbouw, is er een duidelijke overeenkomst. Bij lage voorspelde waarden heeft de landbouwer geen ervaringen met winderosie en bij hoge voorspelde waarden wel. Waar de grenzen liggen tussen het al dan niet ervaren van winderosie door de landbouwers, kan door het beperkte aantal interviews niet bepaald worden.

**Tabel 10.** Voorspelde erosiehoeveelheden ten opzichte van ervaringen van landbouwers met winderosie

Lokatie	X(m) Lambert 72	Y(m) Lambert 72	potentiële erosie- hoeveelheid (ton/ha/jr)	actuele erosie- hoeveelheid (ton/ha/jr)	ervaring landbouwer met wind- erosie
Kluisbergen 1	89308	163896	1,3	0,1	geen
Kluisbergen 2	89262	163755	4,0	1,3	af en toe
Oudenaarde	97385	168920	1,1	0,2	geen
Koekelare	50321	197050	22,5	9,3	wel
Oostkamp 1	73334	203614	5,5	0,2	geen
Oostkamp 2	72662	204211	19,3	8,2	wel
Ruddervoorde	69045	197900	3,2	0,4	geen
Veldegem	66507	201061	20,7	5,9	wel
Poederlee	183249	212953	2,7	0,7	geen

De validatie aan de hand van interviews geeft dus geen informatie over de juistheid van de voorspelde winderosiewaarden. Ze geeft wel aan dat de voorspelde waarden een goede indicatie zijn voor het al dan niet voorkomen van winderosie op bepaalde percelen.

#### 4.4 Kanttekeningen model

Door een aantal tekortkomingen en onzekerheden in het gebruikte model en de beschikbaarheid van gebiedsdekkende data, moeten de in deze studie opgestelde winderosierisico-kaarten en het berekende bodemverlies door winderosie met de nodige voorzichtigheid bekeken worden.

De bodemerodibiliteitsindex werd in deze studie bepaald met behulp van windtunnelmetingen. Ook al is deze benadering nauwkeuriger dan het louter overnemen van erodibiliteitswaarden uit Amerikaanse studies (die in de wEQ-handleiding zijn opgenomen), het aantal

bodemstalen waarop metingen werden uitgevoerd beperkte zich tot 13. Uitgebreider onderzoek is dus aangewezen. Dit was echter niet mogelijk binnen het bestek van deze studie. Voor de schatting van de bodemruwheid per specifiek gewas werd uitgegaan van drie klassen van ruwheden. Dit is een veralgemening ten opzichte van de realiteit waar verschillende bodembewerkingsmachines, verschillende handelwijzen van de landbouwer en de vochtigheid van de bodem voor uiteenlopende ruwheidswaarden zorgen.

Er moet bij de interpretatie ook rekening gehouden worden met het feit dat de klimaatsfactor het gemiddelde per jaar weergeeft en niet per maand of per 14 dagen. Hierdoor kan de reële hoeveelheid erosie door wind tijdens bepaalde periodes van het jaar de geschatte waarde duidelijk overschrijden. Ook het feit dat de klimaatsfactor berekend is op basis van gemiddelde weersgegevens over verschillende jaren, neemt niet weg dat de klimaatsfactor sterk kan verschillen van jaar tot jaar.

Het vochtgehalte van de bodem als beïnvloedende factor bij winderosie, wordt in WEQ enkel onrechtstreeks in rekening gebracht door de klimaatsfactor. Er wordt geen rekening gehouden met een watertafel die, afhankelijk van de diepte waarop zij zich bevindt, voor een drogere of vochtigere bodem kan zorgen.

Bij de lengtefactor werd uitgegaan van vierkante percelen waarbij de lengte werd berekend aan de hand van de perimeter. Ook al gaf deze benadering bevredigende resultaten voor de gemiddelde veldlengte voor Vlaanderen, toch zou ze best nog gevalideerd worden aan de hand van terreinwaarnemingen.

De vegetatiefactor gaat uit van een jaarlijks gelijke gewasontwikkeling. Dit is echter niet het geval door klimaatsvariaties. De vegetatiefactor zal dus van jaar tot jaar verschillen. Voor de nateelten werd bij braak een vegetatiefactor gelijk aan nul genomen. Dit is een onderschatting want ook op braakliggende terreinen kan natuurlijke begroeiing voorkomen. Voor de andere nateelten werd gras als gewas genomen. Deze aanname zorgt voor een overschatting van de vegetatiefactor voor alle nateelten anders dan gras.

O.w.v. de hierboven aangehaalde kanttekeningen mogen de berekende waarden niet bekeken worden als reële erosiewaarden, maar moeten ze eerder gezien worden als een indicatie om het winderosierisico van een bepaald gebied te duiden.

## 4.5 Gevoeligheidsanalyse

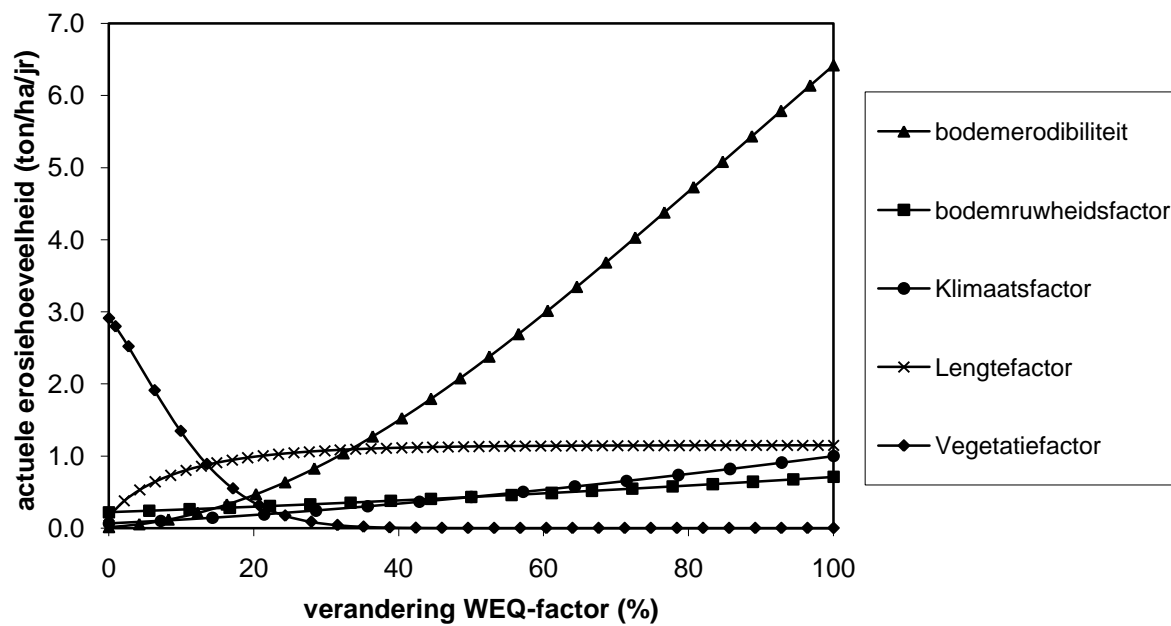
Omwille van een aantal onzekerheden in het model en de bijhorende gegevens, werd een gevoeligheidsanalyse op het model uitgevoerd. Hierbij varieerde telkens één WEQ-factor tussen zijn minimum (0%) en maximum (100%), terwijl de andere factoren van WEQ constant bleven met een waarde gelijk aan hun Vlaams gemiddelde (Tabel 11). Deze procedure werd voor elke factor van WEQ herhaald (Figuur 26).

**Tabel 11.** Het Vlaamse gemiddelde, minimum en maximum van de verschillende WEQ-factoren

WEQ-factor	minimum	maximum	gemiddelde
Bodemerodibiliteit $I$ (ton ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> )	74	695	182
Rugruwheidsfactor $K$ (-)	0,66	1,00	0,78
Klimaatsfactor $C$ (-)	0,02	0,09	0,05
Lengtefactor $L$ (m)	100	4800	193
Platliggend-graangewas-equivalent $SG_e$ (ton ha <sup>-1</sup> )	0,25	24,00	5,76

Figuur 26 toont het effect van de variatie van iedere WEQ-factor op het actueel bodemverlies. Er kan besloten worden dat de bodemerodibiliteitsindex  $I$  de grootste invloed heeft op het eindresultaat. Door  $I$  te laten variëren tussen zijn minimum (74 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) en maximum (695 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>), varieert de actuele erosiehoeveelheid tussen 0 en 6,4 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Ook de vegetatiefactor heeft een grote invloed op het eindresultaat. Bij een variërende vegetatiefactor zal de voorspelde actuele erosie tussen 0 en 3 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bedragen.

De andere factoren, met name de lengte-, klimaats- en bodemruwheidsfactor, hebben een secundaire invloed op het eindresultaat.



**Figuur 26.** Evolutie van de actuele winderosiehoeveelheid bij variërende WEQ-factoren

## 5 Besluit

Ondanks de vele kanttekeningen van het gebruikte model en het gebrek aan validatie, bleek uit de interviews met landbouwers dat de winderosierisicokaarten toch een waardevolle indicatie geven over de locatie van de gebieden gevoelig aan winderosie. De gebieden die de grootste waakzaamheid vergen, zijn gelegen aan de kust, in de Vlaamse Zandstreek, en in de Antwerpse en Limburgse Kempen.

Indien in plaats van indicatieve waarden een grotere nauwkeurigheid van de modelresultaten gewenst is, is een uitgebreide validatie en calibratie aan de hand van veldmetingen vereist. Zolang dit niet wordt uitgevoerd, moeten de bekomen winderosiewaarden met de nodige omzichtigheid worden aangewend.



## 6 Referenties

- Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer (AMINAL) - Afdeling Land (2001). Code van goede praktijk voor het opmaken van een gemeentelijk erosiebestrijdingsplan, 84p.
- Anderson, R.S. en Haff, P.K. (1998). Simulation of eolian saltation. *Science*, 241, 820-823
- Armbrust, D.V., Chepil, W.S. & Siddoway, F.H. (1964). Effects of ridges on erosion of soil by wind. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28, 557-560.
- Armbrust, D.V. en Lyles, L. (1985). Equivalent wind erosion protection from selected growing crops. *Agronomy Journal*, 77, 703-707.
- Badreldin, N.M. (2008). Assessing Wind Erodibility of Various Soil Textural Classes, Masterverhandeling, U. Gent, 93p
- Bagnold, R.A. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, London, 256 p
- Banzhaf, J., Leihner, D.E., Buerkert, A., Serafini, P.G. (1992). Soil Tillage and Wind Break Effects on Millet and Cowpea: I. Wind Speed, Evaporation, and Wind Erosion. *Agronomy Journal*, 84, 1056-1060.
- Batie, S.S. (1983). *Soil Erosion, Crisis in America's cropland*. The Cons. Foundation, Washington, D.C..
- Belly, P-Y. (1964). Sand movement by wind. US Army, Coastal Engineering Research Center, Techn. Memorandum I.
- Bisal, F., and K.F. Nielsen (1962). Movement of soil particles in saltation. *Can. Journal Soil Science*, 42, 81-86.
- Bogman, P., Cornelis, W. en Gabriels, D. (2006). Opwaaiend stof ten gevolge van het bewerken van landbouwgronden, Eindrapport, U. Gent, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Vakgroep Bodembeheer en Bodemhygiëne, Gent, 60p.
- Böhner, J., Schäfer, W., Conrad, O., Gross, J., & Ringeler, A. (2003). The WEELS model : methods, results and limitations. *Catena*, 52, 289-308.
- Bossuyt, M., Torfs, R., Nawrot, T., Den Hond, E., Tilborghs, G., Wildemeersch, D., Chovanova, H., Hooft, P., Verschaeve, L. (2005) MIRA achtergronddocument 2005, Gevolgen voor mens. Vlaamse Milieumaatschappij, 91p.

- Chepil, W. S. (1941). Relation of wind erosion to the dry aggregate structure of a soil. *Sci. Agr.*, 21, 488-507
- Chepil, W.S. (1942). Measurement of wind erosiveness of soils by dry sieving procedure. *Scientific Agriculture*, 25, 154-160.
- Chepil, W.S. (1945a). Dynamics of wind erosion: III. The transport capacity of the wind. *Soil Science*, 60, 475-480.
- Chepil, W.S. (1945b). Dynamics of wind erosion: IV. The translocating and abrasive action of the wind. *Soil Science*, 61, 167-177.
- Chepil W.S., (1954), Seasonal fluctuations in soil structure and erodibility of soil by wind, *Soil Science Society of America Proceedings* 20: 288-292
- Chepil, W.S. (1956). Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20, 288-292.
- Chepil, W.S. (1959). Wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*, 14, 214-219.
- Chepil, W.S., Siddoway, F.H., Armbrust, D.V. (1962). Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 162-165.
- Chepil, W.S. & Woodruff, N.P. (1963). The Physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy*, 28, 587-596.
- Cole, G.W., Lyles, L. and Hagen, L.G. (1982). A simulation model of daily wind erosion soil loss. *ASAE Pap.* 82, p. 2575.
- Cooke, R., Warren, A. en Goudie, A. (1993). *Desert geomorphology*. UCL Press, St. Ives, 526p.
- Cornelis, W.M. (2005). Hydroclimatology of wind erosion in arid and semi-arid environments, *Dryland ecohydrology*, 23-45
- Cornelis, W.M. (2007). *Soil Erosion Processes and Control, Partim Wind Erosion*, Lecture notes, Universiteit Gent, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, 79 p.
- Cornelis, W.M. en Gabriels, D. (2003a). A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 1033-1041.
- Cornelis, W.M. en Gabriels, D. (2003b). The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models. *Sedimentology*, 50, 771-790
- Cornelis, W.M. en Gabriels, D. (2004). A simple model for the prediction of the deflation threshold shear velocity of dry loose particles. *Sedimentology*, 51, 39-51.
- Cornelis, W.M., Erpul, G. & Gabriels, D. (2004a). The I.C.E. wind tunnel for water and wind interaction research (Chapter 13). In: Visser, S. & Cornelis, W.M. (Eds.). *Wind and rain interaction in erosion*. Tropical Resource Management Paper 50, Wageningen, The Netherlands. 195-224. 232 p.

- Cornelis, W., Gabriels, D. & Hartmann, R., (2004b). A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1154-1161.
- Cornelis, W., Gabriels, D. & Hartmann, R., (2004c). A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: II. Calibration and Verification. *Soil Science of America Journal*, 68, 1162-1168.
- Cornelis, W.M., Oltenfreiter, G., Gabriels, D., Hartmann, R. (2004d). Splash-Saltation of Sand due to Wind-Driven Rain: Horizontal Flux and Sediment Transport Rate. *Soil Science Society of America*, 68, 41-46.
- Cornelis, W.M., Oltenfreiter, G., Gabriels, D., Hartmann, R. (2004e). Splash-saltation of sand due to wind-driven rain: vertical deposition flux and sediment transport rate. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 32-40.
- Cornelis, W.M. en Gabriels, D. (2005). Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*, 61, 315-332.
- Dehoorne, P. (1983). Onderzoek betreffende de migratie van het centrale wandelduin in het staatsnatuureservaat "De Westhoek", De Panne, Licentiaatsverhandeling, K. U. Leuven, 156p.
- Deleu, J. (2005). Begroten van het potentieel door wind in Vlaanderen, Ingenieursverhandeling, U. Gent, 124p.
- De Meester, S. (1982). Onderzoek omtrent de deflatiegevoeligheid van lemig zand en lichte zandleem. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven, 117 p.
- Denolf, D. (1979). Winderosie op de duinenreep van het Zwin. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven, 85 p.
- de Vos, J.A. (1996). Testing compost as an anti wind erosion agent in a wind tunnel. *Soil Technology* 9, 209-221
- De Vry, G. (1980). Regionaal-agrarische studie van Wakkerzeel en omgeving. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven, 127p.
- Dierickx, W., Gabriels, D., Cornelis, W.M. (2002). Wind tunnel study on oblique windscreens. *Biosyst. Eng.* 82 (1), 87–95.
- Düwel, O. (1995). Die Bedeutung der Bodenrauigkeit für die Bodenerosion durch Wind – Ein Beitrag zur Quantifizierung der Bodenverluste. Dissertation, Universität Göttingen, 135 p.
- FAO (1960). Soil erosion by wind and measures for its control on agricultural lands. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agricultural Development Paper 71, Rome, Italy.

- Fryrear, D.W. (1998). Modeling Wind Erosion. In Proc. Of the Expert Group Meeting, 22-25 April, 1997, Cairo, Egypt. Wind Erosion in Africa and West Asia: Problems and Control Strategies, ed M.V.K. Sivakumar, M.A. Zobisch, S. Koala, and T. Maukonen. pp 143-152.
- Fryrear, D.W., Krammes, C.A., Williamson, D.L., Zobeck, T.M. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil Water Conservation*. 49 : 183 – 188
- Fryrear, D.W., Saleh, A., Bilbro, J.D., Schomberg, H.M., Stout, J.E. & Zobeck, T.M. (1998). Revised wind erosion equation (RWEQ). Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-Agricultural Research Service, Lubbock, Texas, WEWC Technical Bulletin No. 1, 178 p.
- Fryrear, D.W., Sutherland, P.L., Davis, G., Hardee, G. & Dollar, M. (2001). Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In : Stott, D.E., Mohtar, R.H. & Steinhardt, G.C. (Eds.). *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization, Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, May 1999*, 760-765.
- Funk, R., Skidmore, E.L. & Hagen, L.J. (2004). Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS. *Environmental Modelling & Software*, 19, 177-183.
- Goossens, D. (1992). *Eolian Processes and Eolian Landforms. Lecture Notes, ICE, Gent.*
- Goossens, D. (2003). On-site and off-site effects of wind erosion. In: *Wind erosion on agricultural land in Europe: research results for land managers* (Ed. Warren, A.). European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, 29-38.
- Gregory J.M., Wilson, G.R., Singh, U.B., Darwish M.M. (1998), TEAM: integretad, process-based wind-erosion model, *Environmental Modelling & Software*, 19, 205
- Hagen, L.J. (1991). A wind erosion prediction system to meet user needs. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 106-111.
- Hudson, N. (1981). *Soil conservation. Batsford, Londen*, 324p.
- Klik, A. (2004). Wind Erosion Assessment in Austria using Wind Erosion Equation and GIS. In: Francaviglia, R. (Ed.). *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis. Proceedings from an OECD Expert Meeting, Rome, Italy, March 2003*, 145-154.
- Knottnerus, D.J.C. (1985). *Verstuiven van grond. Beschouwingen over te nemen maatregelen, rapportering van gedaan onderzoek. Haren, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Nota 144*, 57
- Lamond, P. (1978). *Bedrijfsstructurele en ecologische studie van de gemeenten Westouter en Loker. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven*, 167 p.

- López, M.V., De Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Garcia, R., Buschiazzo, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma* 139: 407-411
- Morgan, R.P.C. (1995). *Soil erosion & conservation*. Longmann, Harlow, 198p.
- Neuman, C.M. (2003) Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sediment particles by wind, *Boundary-Layer Meteorology*, 108, 61-89
- Nickling, W.G. (1984). The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind. *Sedimentology*, 31, 111-117.
- NRCS (National Resources Conservation Service). (1997). *Agricultural Handbook 703, Predicting Soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, USDA, ARS.
- NRCS (National Resources Conservation Service). (2003). *National Agronomy Manual*, United States Department of Agriculture (USDA), 227p.
- Papendick, R.I. (1998). Northwest Columbia Plateau Wind Erosion/Air Quality Project Annual Report. Best Management Practices for Controlling Wind Erosion and Air Quality on Columbia Plateau Croplands. Coordinator: K.E. Saxton, U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service, Smith Hall, Washington State University, Pullman, Washington.
- Parrein, L. (1980). *Langemark: een agrarisch geografische studie*. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven, 126 p.
- Plasschaert, T. (1985). *Analyse van de windwerking op een kleine kustduinstrook*. Licentiaatsverhandeling, K.U. Leuven, 247 p.
- Poesen, J. en Govers, G. (1994). *Bodemerosie in Midden-België. Een stand van zaken*. *Onze Alma Mater*, 48 (3): 251-267
- Poesen, J., Govers, G., Goossens, D. (1996). Verdichting en erosie van de bodem in Vlaanderen. *Tijdschrift van de Belgische Vereniging voor Aardrijkskundige Studies (BEVAS)*, 2, 141-181.
- Pope, C.A., Hill, R.W., Villegas, G.M. (1999) Particle air pollution and daily mortality on Utah's Wasatch Front. *Environmental Health Perspectives*, 107, 567-573
- Prandtl, H. (1935). The mechanics of viscous fluids. In: *Aerodynamic theory*. Springer-Verlag, Berlin, 34-208.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. (1998) *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. *Agriculture Handbook nr. 703*. Washington DC, United States Department of Agriculture, 384 p.

- Riksen, M. en de Graaff, J. (2001). On-site and off-site effects of wind erosion on European light soils. *Land Degradation & Development*, 12, 1-11.
- Riksen, M., Brouwer, F., de Graaff, J. (2003a). Soil Conservation policy measures to control wind erosion in northwestern Europe. *Catena*, 52, 309-326.
- Riksen, M, Brouwer, F., Spaan, W., Arrúe, J.L., López, M.V. (2003b). What to do about wind erosion. In: Warren, A. (Ed.). *Wind erosion on agricultural land in Europe: Research results for land management*. European Commission, Environment and sustainable Development Programme. Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 76p.
- Riksen, M., Vigiak, O., Spaan, W. (2003c). Windbreaks: evaluating and planning. In: Goossens, D. & Riksen, M. (Eds.), 2004. *Wind erosion and dust dynamics: observations, simulations, modelling*. ESW Publications, Wageningen, 103-121.
- Robinson, D.N. (1968). Soil erosion by wind in East Lincolnshire, March 1968. *East Midlands Geographer*, 4, 351-362.
- Rollé, H. (2006). *Stofemissie ten gevolge van winderosie en landbouwactiviteiten op een zandleembodem in de Vlaamse Ardennen*, Ingenieursverhandeling, U. Gent, 185p.
- Shao, Y. (2000). *Physical and Modelling of Wind Erosion*, Kluwer Academic Publishers. London. United Kingdom, 145p.
- Shao, Y., Raupach, M.R., Leys, J.F. (1996). A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Australian Journal of Soil Research*, 34, 309-342.
- Siddoway, F.H., Chepil, W.S., Armbrust, D.V. (1965). Effect of kind, amount and placement of residue on wind erosion control. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, 8, 327-331.
- Skidmore, E.L. (1986). Wind erosion climatic erosivity. *Climatic Change*, 9, 195-208.
- Skidmore E. L. en Woodruff N. (1968). Wind Erosion forces in the United States and their use in prediction soil loss, *Agriculture Handbook No. 346*, 42p.
- Skidmore, E.L., Fisher, P.S., Woodruff, N.P. (1970), *Wind Erosion Equation : Computer solution and Application*, *Soil. Sci. Amer. Proc.*, Vol 34, 931-935
- Stallings, J.H. (1957). *Wind-Erosion Control*. In: *Soil Conservation*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New York. pp. 238-269.
- Sterk, G., Herrmann, L., Bationo, A. (1996). Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation & Development*, 7, 325-335
- Thornthwaite, C.W. (1931). *Climates of North America According to a New Classification*. *Geographical Review*, 25, 633-655.

- Vandebeek, E. (1986). Winderosie op akkergronden in de Limburgse Kempen. Licentiaatsverhandeling K.U.Leuven, 179pp.
- Van Rompaey, A., Govers, G., Van Oost, K., Van Muysen, W., Poesen, J. (2000). Een schatting van bodemerosiesnelheden op perceelsniveau – bij de kaartbladen ‘Watererosie per landbouwperceel’, ‘Bewerkingserosie per landbouwperceel’, ‘Totale erosie per landbouwperceel’. Rapport voor het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, AMINAL, Afdeling Land, Brussel.
- Verbist, K., Schiettecatte, W., Gabriels, D. (2004) Computermodel RUSLE C-factor, Eindrapport, 79p.
- Volkaerts, G. (1980). Een agrarische studie over de zandleem-leemstraak bij Leuven. Licentiaatsverhandeling K.U.Leuven, 174pp.
- Warburton, J. (2003). Wind-splash erosion of bare peat on UK upland moorlands. *Catena* 52, 191-207
- Warren, A. en Barring, L. (2003). Introduction. In: Warren, A. (Ed.). Wind erosion on agricultural land in Europe: Research results for land management. European Commission, Environment and sustainable Development Programme. Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 76p.
- Wind Erosion Research Unit (WERU) (2008), <http://www.weru.ksu.edu/> , Kansas City University, US
- Williams, J.R. en Arnold, J.G. (1997). A system of erosion-Sediment yield models, *Soil Technology*, 11, 43-55
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, 27, 129-144.
- Wils, C., Paelinckx, D., Adams, Y., Berten, B., Bosch, H., De Knijf, G., De Saeger, S., Demolder, H., Guelinckx, R., Lust, P., Oosterlynck, P., Scheldeman, K., T’Jollyn, F., Van Hove, M., Vandenbussche, V. & Vriens, L. (2004). Biologische Waarderingskaart en natuurgerichte bodembedekkingkaart van het Vlaamse Gewest. Integratie van de BWK en vereenvoudiging tot een 90- en 32-delige legende (80% BWK, versie 2 van 1997 tot 2003 en 20% BWK, versie 1). Rapport en digitaal bestand Instituut voor Natuurbehoud IN. R2004.08 Brussel. 39 p.
- Woodruff N.P. en Siddoway, F.H. (1965). A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29, 602-608.
- Zenchelsky, S.T., Delaney, A.C., Pickett, R.A. (1976). Thor organic component of wind-blown soil aerosols as a function of wind velocity. *Soil Science*, 122, 129-132

- Zobeck, T.M. (1991). Abrasion of crusted soils : Influence of abrader flux and soil properties. Soil Science Society of America, 55, 1091-1097.
- Zobeck, T.M., Sterk, G., Funk, R., Rajot, J.L., Stout, J.E., Van Pelt, R.E. (2003). Measurements and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. Earth Surface Processes and landforms, 28, 1163-1188



## 7 Appendix

### A. Lijst met afkortingen

AGIV	Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen
C	Klimaatsfactor
EF	Erodeerbare Fractie
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
I	Bodemerosibiliteitsindex
I.C.E	International Centre for Eremology
K	Rugruwheidsfactor
Kr	Werkelijke rugruwheid
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
L	Veldlengte
L <sub>0</sub>	Maximale veldlengte
NRCS	National Resources Conservation Service
PM <sub>10</sub>	Sofdeeltjes met een aërodynamische diameter kleiner dan 10 µm
PTF	Pedotransferfunctie
GIS	Geografische Informatiesystemen
RUSLE	Revised Universal Soil-Loss Equation
Rw	Droge massa van het bovengronds deel van een gewas
RWEQ	Revised Wind Erosion eQuation
SR	Bodemruwheid
SGe	platliggend-graangewas-equivalent
TEAM	Texas Tech Wind Erosion Analysis Model
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Universal Soil-Loss Equation
V	Vegetatiefactor
V <sub>H</sub>	Vegetatieomzettingsfactor
WEAM	Wind Erosion Assessment Model

WEELS	Wind Erosion on European Light Soils
WEG	Winderodibiliteitsgroepen
WEPS	Wind Erosion Prediction System
WEQ	Wind Erosion eQuation
WF	Veldlengtefactor

## B. Interview landbouwers over stuifgevoelige landbouwgronden in Vlaanderen

Datum: \_\_\_\_\_

Interviewer: \_\_\_\_\_

Interviewnr: \_\_\_\_\_

Plaats/Regio: \_\_\_\_\_

### Algemeen

Bedrijfstype : \_\_\_\_\_ Oppervlakte: \_\_\_\_\_ ha

1= akkerbouw; 2= veehouderij; 3= gemengd

Bedrijfsvoering: \_\_\_\_\_

1= conventioneel; 2= ecologisch/biologisch/organisch; 3= conservering landbouw (gericht op bodem-  
bescherming)

1) Wat zijn de hoofdgewassen op uw bedrijf? \_\_\_\_\_

---

---

---

---

2) Wat zijn voor u de belangrijkste problemen/beperkingen bij het telen van deze gewassen op uw  
akkers?

---

---

---

---

### Stuifgevoeligheid

3) Heeft u te maken met stuifgevoelige bodems op uw bedrijf?  Ja,  Nee,  Ik weet niet.

Indien ja ga door naar vraag 5.

4) Wat verstaat u onder winderosie/stuiven en heeft u dit wel eens in de omgeving zien gebeuren?

Indien het derde antwoord van toepassing is ga door naar vraag 5 anders vraag 11

Is bekend met winderosie, maar heeft het nooit in zijn omgeving gezien.

Is niet bekend met winderosie, geeft na uitleg aan dat het niet in zijn omgeving plaats vindt

Is niet bekend met winderosie, geeft na uitleg aan dat het wel in de omgeving plaats vindt.

5) Hoe vaak komt het voor?

Een paar keer per jaar.

Eens in de 1 à 2 jaar

Anders \_\_\_\_\_

6) In welke periode treedt winderosie/verstuing het vaakst op? \_\_\_\_\_

7) Welke akkers zijn het meest gevoelig voor verstuing? (Op een kaart laten aanwijzen en nummeren en de volgende tabel invullen)

Perceel nr	Oppervlakte (ha)	Bodemtype	Gewasrotatie (vul naast naam ook zaai en oogst datum in)				
			Gewas 1	Gewas 2	Gewas 3	Gewas 4	Gewas 5

8) Welke van deze gewassen zijn het meest stuifgevoelig? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

