



ALTEERRA

WAGENINGEN UR



Huidige maatregelen tegen water- en winderosie in Nederland

Alterra-rapport 2131
ISSN 1566-7197

R. Hessel, J. Stolte en M. Riksen



ALTEERRA

WAGENINGEN UR





ALTEERRA
WAGENINGEN UR



Huidige maatregelen tegen water- en winderosie in Nederland

Alterra-rapport 2131
ISSN 1566-7197

R. Hessel, J. Stolte en M. Riksen



ALTEERRA
WAGENINGEN UR



Huidige maatregelen tegen water- en winderosie in
Nederland

Dit onderzoek is in 2010 uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie in het beleidsondersteunend Domein Natuur, Landschap en Platteland, Thema Bodem, Water en Klimaat. Projectcode BO-11-002.01-008 (Europese Bodemstrategie)

Huidige maatregelen tegen water- en winderosie in Nederland

R. Hessel¹, J. Stolte² en M. Riksen³

1 Centrum Bodem, Alterra, DLO, Wageningen

2 Bioforsk Soil and Environment, Noorwegen. Voorheen Centrum Bodem, Alterra, DLO, Wageningen

3 Land Degradation and Development Group, Wageningen University

Alterra-rapport 2131

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2011



Referaat

R.Hessel, J.Stolte en M.Riksen, 2011. *Huidige maatregelen tegen water- en winderosie in Nederland*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2131. 50 blz.; 9 fig.; 5 tab.; 70 ref.

In dit rapport wordt beschreven welke maatregelen er in Nederland op dit moment genomen worden tegen water- en winderosie. Het rapport bespreekt de voor Nederland relevante water- en winderosieprocessen, meet- en modelleertechnieken voor winderosie, de maatregelen die mogelijk zouden zijn, en de maatregelen en verordeningen die op dit moment toegepast worden dan wel van kracht zijn.

Trefwoorden: Watererosie, winderosie, anti erosie maatregelen, anti erosie verordeningen, erosiebestrijding.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2131

Wageningen, februari 2011

Inhoud

Samenvatting	7
Inleiding	9
1 Erosieprocessen	11
1.1 Watererosie	11
1.1.1 Spaterosie	11
1.1.2 Oppervlakte-erosie	12
1.1.3 Rilerosie	12
1.1.4 Geulerosie	12
1.1.5 Tunnelerosie	13
1.1.6 Oevererosie	13
1.1.7 Depositie	14
1.1.8 Gevolgen	14
1.2 Winderosie	14
1.2.1 Deflatie	16
1.2.2 Transport	16
1.2.3 Abrasie	16
1.2.4 Depositie	17
1.2.5 Gevolgen	17
2 Kwantificeren van erosie	19
2.1 Meten van winderosie	20
2.2 Modelleren van winderosie	22
3 Nederlandse situatie	23
3.1 Erosie in Nederland	23
3.1.1 Watererosie	23
3.1.2 Winderosie	26
3.2 Mogelijke maatregelen	29
3.2.1 Watererosie	30
3.2.2 Winderosie	31
3.3 Huidige maatregelen en verordeningen	33
3.3.1 Watererosie	34
3.3.2 Winderosie	38
4 Conclusies	43
Literatuur	45

Samenvatting

Bodemerosie is, door zijn consequenties voor het milieu zoals verlies van vruchtbare grond, sedimentatie en vervuiling, een wijdverbreid probleem in veel gebieden van de wereld. Op Europese schaal is bodemerosie aangemerkt als één van de belangrijkste bodembedreigingen (Europese Bodemstrategie) wat ook zijn weerslag vindt in het voorstel voor een Kaderrichtlijn Bodem. In Nederland is vooral erosie veroorzaakt door water en wind van belang. Dit rapport beschrijft waar deze beide vormen van erosie optreden in Nederland, en welke maatregelen er tot nu toe zijn genomen om bodemerosie tegen te gaan. Deze informatie geeft een indicatie voor het eventueel aanwijzen van prioritaire gebieden in Nederland.

In Nederland zijn verschillende watererosie processen actief, zoals spaterosie, oppervlakte-erosie, rilerosie, geulerosie, tunnelerosie en oevererosie. Deze erosie heeft on-site gevolgen zoals het verlies van vruchtbare grond en schade aan gewassen, maar in de Nederlandse context worden de off-site effecten van erosie vaak als ernstiger ervaren dan de on-site gevolgen. De off-site gevolgen bestaan vooral uit wateroverlast, modderstromen en sedimentatie en kunnen tot aanzienlijke schade leiden.

In Nederland treedt ook winderosie op. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen deflatie, transport, abrasie en depositie. Winderosie kan ook een veelheid van gevolgen hebben, zoals afname van het organisch stofgehalte, bodemstructuur, vochthoudendheid en vruchtbaarheid. Meststoffen, bestrijdingsmiddelen, ziekten en onkruiden kunnen zich door winderosie verspreiden, en kunnen zorgen voor o.a. vervuiling en gezondheidsproblemen. Het meegevoerde sediment kan zowel on-site als off-site schade veroorzaken, bv. aan gewassen, machines en gebouwen.

Hoewel erosie in het grootste deel van Nederland niet zo'n probleem is, zijn er toch gebieden waar watererosie en winderosie wel degelijk van belang zijn. Voor watererosie gaat het dan met name om akkerbouw op hellingen, wat voorkomt in Zuid-Limburg, rond Groesbeek, en op enkele andere plaatsen zoals op de flanken van stuwwallen. Voor winderosie gaat het met name om de Veenkoloniën, de bollenvelden, en in mindere mate ook om zandgronden in Brabant en Limburg en om enkele polders waar het landschap een open karakter heeft en waar akkerbouw bedreven wordt.

Er bestaat een veelheid van bio-fysische maatregelen die genomen kunnen worden om erosie door water en wind te bestrijden. Deze maatregelen richten zich over het algemeen op het verkleinen van de erosieve kracht van water en wind, of op het verhogen van de weerstand van de bodem tegen erosie. Voor watererosie gaat het dan om maatregelen die de hoeveelheid afvoer verlagen, de stroomsnelheid verlagen, of de bodembedekking verhogen. Bij winderosie gaat het om maatregelen die de windsnelheid aan het bodemoppervlak verlagen, de bodem ruwer maken of de bodembedekking groter. Welke maatregel het best toepasbaar is hangt af van de specifieke lokale situatie, en wordt bepaald door zowel bio-fysische als socio-economische aspecten. Vaak zijn het de socio-economische factoren die de doorslag geven wat betreft het wel of niet toepassen van maatregelen. Als er maatregelen worden getroffen geven economische motieven vaak de doorslag in de keuze voor een bepaalde maatregel; duurdere maatregelen kunnen namelijk alleen uit voor teelten met een hoge winstmarge en/of het risico op hoge kosten door schade als gevolg van erosie.

In Nederland wordt het wel of niet toepassen van maatregelen tegen erosie in eerst instantie overgelaten aan de bodemgebruikers. Ook het bestaande beleid appelleert aan de eigen verantwoordelijkheid, al worden er ook middelen gebruikt zoals wettelijke verplichtingen en het verstrekken van subsidies voor het toepassen van bepaalde maatregelen.

In Zuid-Limburg worden van oudsher al maatregelen tegen watererosie genomen, zoals bv. graften. Echter, een samenspel van schaalvergroting en andere factoren heeft ertoe geleid dat deze maatregelen niet meer afdoende zijn. Sinds de jaren 80 heeft erosiebestrijding dan ook een plaats in het beleid van de provincie Limburg. Bij het formuleren van dit beleid wordt samengewerkt met het betrokken Waterschap (Roer en Overmaas), de betrokken gemeenten en met ZLTO en het Productschap. Deze samenwerking heeft geleid tot nieuwe verordeningen voor erosiebestrijding op landbouwgronden, die ingaan per 1 januari 2013. Het leidend principe binnen deze verordeningen is het toepassen van niet-kerende grondbewerking in combinatie met een bodembedekker. Daarnaast bestaat er een knelpuntgerichte aanpak, die door middel van bv. grasstroken en opvangbekkens schade aan bebouwing en infrastructuur wil voorkomen.

Wat winderosiebestrijding betreft wordt er in Nederland weinig voorgeschreven. Er zijn op dit moment geen maatregelen verplicht. Wel was het voor middelen en producten die gebruikt werden ter voorkoming van winderosie mogelijk een ontheffing te verkrijgen volgens het Meststoffenbesluit 1977. Eén van de belangrijkste vrijstellingen was dat het in gebieden met een winderosieprobleem was toegestaan om drijfmest uit te rijden in plaats van te injecteren. Deze uitzonderingspositie is echter per 1-1-2010 vervallen voor gebieden met een veenkoloniaal bouwplan, en is nu alleen nog voor Texel van kracht. Voor sommige andere middelen, zoals papiercellulose bestaat een vrijstelling volgens hetzelfde besluit. Hoewel het genoemde Meststoffenbesluit in 2008 is vervallen blijven de ontheffingen van kracht tot de Meststoffenwet en Wet Milieubeheer duidelijkheid verschaffen over de middelen en producten tegen winderosie. Een andere maatregel die in de Veenkoloniën op uitgebreide schaal wordt toegepast is het gebruik van groenbemesters die bescherming tegen winderosie geven tijdens die perioden in het jaar waarin het gewas dit niet afdoende doet.

Samenvattend kan gezegd worden dat bodemerosie in Nederland regionaal een probleem is en dat dit probleem zich beperkt tot akkerland. Voor de eventuele Kaderrichtlijn Bodem zouden dan ook vooral de lössgebieden van Zuid-Limburg en de Veenkoloniën het meest in aanmerking komen om aangewezen te worden als prioritaire gebieden.

De maatregelen die genomen worden tegen watererosie lijken, mits volledig geïmplementeerd, voldoende, al kunnen ze erosie niet helemaal voorkomen. Er worden ook maatregelen tegen winderosie getroffen, maar dit wordt meer aan de boeren zelf overgelaten dan het geval is voor watererosie. Omdat deze maatregelen veelal niet opgelegd worden en omdat de maatregelen zelf vaak economisch niet uit kunnen voor gewassen die relatief weinig opbrengen, is deze toepassing van maatregelen minder structureel dan voor watererosie. Vanuit het oogpunt van erosiebestrijding zou het ontwikkelen van beleid tegen winderosie een goede zaak zijn. Zulk beleid zou tot stand moeten komen door samenwerking tussen overheid en LTO, om te zorgen dat het geformuleerde beleid niet alleen erosie effectief bestrijdt, maar ook voldoende mogelijkheden biedt aan de boeren.

Inleiding

Bodemerosie is, door zijn gevolgen voor het milieu zoals verlies van vruchtbare grond, sedimentatie en vervuiling, een wijdverbreid probleem in veel gebieden van de wereld. Op Europese schaal is bodemerosie aangemerkt als één van de belangrijkste bodembedreigingen (Europese Bodemstrategie), wat ook zijn weerslag vindt in het voorstel voor een Kaderrichtlijn Bodem. In Nederland is vooral erosie veroorzaakt door water en wind van belang (Maring et al., 2008). Dit rapport beschrijft waar deze beide vormen van erosie optreden in Nederland, en welke maatregelen er tot nu toe zijn genomen om bodemerosie tegen te gaan. Deze informatie geeft een indicatie voor het eventueel aanwijzen van prioritaire gebieden in Nederland. Andere vormen van erosie die potentieel van belang zouden kunnen zijn in Nederland, zoals bewerkingserosie en oogsterosie, worden niet behandeld in dit rapport. Slomp wordt ook niet behandeld in dit rapport; voor informatie hierover zie Hack-ten Broeke et al. (2009).

Dit rapport is vooral gebaseerd op literatuurstudie, aangevuld met enkele gesprekken met experts op het gebied van water- en winderosie in bepaalde delen van Nederland. De volgende personen zijn geraadpleegd: Harrie Winteraeken (Waterschap Roer en Overmaas), Paul Geelen (Provincie Limburg), John Tobben (LTTO), Klaas Wijnholds (PPO, proefboerderij Valthermond), Peter Wiltink (IRS) en Philip Ehlert (Alterra). Daarnaast zijn door studenten van Wageningen universiteit een aantal boeren, burgers en andere stakeholders geïnterviewd in één van de meest erosiegevoelige gebieden, namelijk in het Ransdalerveld in Zuid-Limburg.

1 Erosieprocessen

Bodemosie door water en wind is een natuurlijk proces dat echter door de mens sterk kan worden beïnvloed. Het risico voor bodemosie hangt niet alleen af van het klimaat, reliëf, bodemkarakteristieken en morfologie, maar ook van landgebruik en bodemmanagement. Door deze veelheid van factoren is de ruimtelijke en temporele variatie in het bodemosieproces erg groot. De processen van erosie zijn onder te verdelen in het losmaken, transporten en afzetten (depositie) van bodemdeeltjes. Deze processen treden zowel bij wind- als watererosie op, maar er zit verschil in de kracht van de processen en de samenstelling van het sediment. De dichtheid van water is veel groter dan die van lucht en daarmee ook de erosieve kracht, waardoor grotere bodemdeeltjes getransporteerd kunnen worden. Aan de andere kant is de snelheid van lucht veel hoger, wat resulteert in een grote erosieve kracht, maar er worden hierbij alleen relatief kleine deeltjes getransporteerd. Een ander verschil is dat de windrichting varieert, waardoor de richting van de watererosie kan veranderen per erosiegebeurtenis, wat niet het geval is bij watererosie.

1.1 Watererosie

Watererosie-soorten en -processen kunnen worden onderscheiden naar de schaal waarbij ze optreden. Dat loopt van spaterosie op de heel kleine schaal naar oevererosie op stroomgebiedsniveau.

1.1.1 Spaterosie

Spaterosie is het losmaken en transporteren van bodemdeeltjes door de inslag van een regendruppel. Spaterosie treedt op, op het moment dat het bodemoppervlak onbeschermd is tegen neerslag. De mate van spaterosie is afhankelijk van meerdere factoren. Ten eerste is dat de erosiviteit van de neerslag, vaak uitgedrukt als kinetische energie (Sharma, 1996; Toy et al., 2002). De kinetische energie van een druppel hangt af van de massa en snelheid van de druppel. De hoeveelheid druppels en hun massa hangt af van de neerslagintensiteit en neerslaghoeveelheid. De tweede factor die de mate van spaterosie bepaalt is de dikte van de waterlaag op het bodemoppervlak op het moment van de inslag. De effectiviteit van de spaterosie vermindert met toenemende dikte van deze waterlaag omdat de laag dempend werkt op de inslag (Sharma, 1996). Ten derde hangt de mate van spaterosie af van de bodemkarakteristieken aggregaatstabiliteit, afschuifspanning, bodemruwheid, vochtgehalte, textuur, organische stofgehalte, bulk dichtheid, gevoeligheid voor dispersie en mineralogie (Lal, 1990; Sharma, 1996; Bradford en Huang, 1996). Ten vierde is de mate van spaterosie afhankelijk van de invalshoek van de neerslag, welke afhankelijk is van de helling en de windrichting. Helling heeft een complexe invloed op spaterosie, omdat het ook de hoeveelheid druppels per oppervlakte-eenheid en de mate van bodemverslemping beïnvloedt. Daarnaast beïnvloedt de wind niet alleen de inslaghoek maar ook de kinetische energie. Ten slotte hangt de mate van spaterosie af van de vegetatiekarakteristieken, in het bijzonder van de bedekkingsgraad. Bodembedekking is een effectief middel om spaterosie tegen te gaan. Omdat het proces niet afhankelijk is van afvoer kan het het meest dominante proces op kleine schaal zijn, maar het verliest zijn significantie op stroomgebiedsniveau wanneer andere erosieprocessen mee gaan spelen.

1.1.2 Oppervlakte-erosie

Oppervlakte-erosie (sheet erosie) is erosie als gevolg van stroming van een (uniforme) waterlaag over het bodemoppervlak, of als erosie door kleine kanaaltjes die continu van positie veranderen. De erosie als gevolg van stroming over het oppervlak kan over het algemeen worden verwaarloosd (Bradford en Huang, 1996). De transporthoeveelheid hangt af van de kracht van de stroom, die afhankelijk is van helling en stroomsnelheid. Oppervlakkige afstroming is echter wel verantwoordelijk voor het transport van de bodemdeeltjes die door spaterosie zijn losgemaakt. De transporthoeveelheid wordt vergroot door de inslag van de regendruppels op de stroom (Sharma, 1996; Bradford en Huang, 1996; Toy et al., 2002). Spat- en oppervlakte-erosie samen worden ook wel aangeduid als interrill-erosie.

1.1.3 Rilerosie

Rilerosie ontstaat door oppervlakkige afstroming waarbij het water zich concentreert in een aantal duidelijke stroombanen. Oppervlakkige afstroming wordt geconcentreerd onder invloed van kleine, willekeurige variaties in topografie. Door concentratie van de afstroming zal de erosieve kracht van de stroom snel toenemen. Voor het initiëren van insnijding in het bodemoppervlak moet de stroomsterkte een zekere drempelwaarde overschrijden. Deze waarde wordt bepaald door eigenschappen van het bodemoppervlak (cohesie, textuur en aggregaat-stabiliteit) en de vegetatie. Rillen zijn kleine insnijdingen die gewoonlijk vertakt zijn door kleine, verticale insnijdingen loodrecht op de rilrichting. In cohesieve gronden kunnen de rillen diep en smal zijn, waar bij niet-cohesieve gronden de wanden instorten en de rillen ondiep en breed zijn. Op landbouwgronden is de bodem onder de ploeglaag over het algemeen stabiel, waardoor op het moment dat de ril die diepte bereikt hij vaak breder wordt in plaats van dieper. Op het moment dat een ril wordt gevormd, neemt de transportcapaciteit toe. De hoeveelheid sediment die verplaatst wordt door waterafvoer, de rilerosie, is dan ook veel groter dan bij het proces van oppervlakte-erosie. Rillen kunnen door agrarische activiteit (ploegen, eggen etc.) worden weggehaald en hoeven niet op de zelfde plaats weer opnieuw te ontstaan.

De mate van rilerosie is afhankelijk van de hoeveelheid waterafvoer, bodem-erodibiliteit, hellinglengte, hellingvorm, hellingshoek en het landgebruik. Rilerosie treedt op waar de bodem niet beschermd is tegen stromend water en waar de bodem een hoge erodibiliteit heeft. Vandaar dat op landbouwgronden en bouwplaatsen vaker rilerosie optreedt dan bij ander landgebruik. Omdat rilerosie veroorzaakt wordt door stromend water start de vorming van rillen per definitie onder de waterscheiding, en neemt op rechte hellingen de hoeveelheid rillen toe in hellingafwaartse richting door de toename in erosie. Steile hellingen met een hoge erodibiliteit, in combinatie met een hoge neerslagintensiteit, veroorzaken dat de rillen al enkele meters onder de waterscheiding beginnen.

1.1.4 Geulerosie

Erosiegeulen kunnen ontstaan door oppervlakkige afstroming. Rillen kunnen uitgroeien tot geulen als ze niet tijdig door hellingprocessen of menselijk ingrijpen verwijderd worden. Geulen kunnen echter ook mede ontstaan door stroming door het bodemprofiel, en door het instorten van tunnels gevormd door erosie (zie volgende paragraaf). Daarnaast kunnen geulen ontstaan waar water zich concentreert, zoals in bewerkingssporen. Een belangrijk onderscheid met rillen is dat geulen zo groot zijn dat ze niet meer eenvoudig kunnen worden weggehaald met de gebruikelijke landbouwmethoden. Men spreekt in het algemeen over geulen als de dwarsdoorsnede van het kanaal groter is dan 1 voet² (929 cm²) (Poesen, 1993; Morgan, 2005). Karakteristieken van geulen zijn (Nordström, 1988) een steil, ingesneden kanaal, vaak met zijdelingse vertakkingen, niet watervoerend, en veelal gevormd in niet-geconsolideerde materialen. In de lössgebieden in Nederland en België wordt een onderscheid gemaakt tussen zogenaamde bank gullies en ephemeral gullies. Bank gullies

treden op in steilranden en ephemeral gullies op plaatsen waar water concentreert, zoals in laagten (Poesen, 1993). Geulerosie kan ernstige gevolgen hebben, zowel op het veld (door bodemverlies) als verder stroomafwaarts (door sedimentatie). Vruchtbare landbouwgrond gaat op de velden verloren en stroomafwaarts lopen mogelijke reservoirs/bufferbasins en rivierbeddingen vol en neemt het risico op overstroming toe.

1.1.5 Tunnelerosie

Tunnelerosie is het ontstaan van ondergrondse tunnels door stromend water. De tunnels kunnen worden gevormd door een tweetal processen. Ten eerste kan een tunnel ontstaan door dierlijke activiteiten of plantenwortels. Ten tweede kan een tunnel ontstaan door doorsijpelen van water.

Randen van terrassen zijn erg gevoelig voor tunnelerosie, in het bijzonder wanneer de terrassen geen goede oppervlakte afvoer hebben en wanneer een deel van het terras is gemaakt door ophoging op de oorspronkelijke bodem. In dat geval kunnen er tunnels gevormd worden over het oppervlak van de oorspronkelijke bodem. Figuur 1 laat een tunnel zien in een terrasrand in Limburg.



Figuur 1

Tunnelerosie in een terrasrand in Zuid-Limburg (foto J.Stolte).

1.1.6 Oevererosie

Oevererosie treedt op door ondergraving en massabeweging. Het beïnvloedt relatief kleine gebieden, maar levert de meeste schade in hoog productieve gronden (Troeh et al., 1990). Rivierlopen zijn dynamisch, maar de hoogste erosiehoeveelheden zijn te verwachten na plotselinge veranderingen in landgebruik in het stroomgebied (bv. net na ontbossing). In de afgelopen decennia heeft men in het kader van diverse natuur-

herstelprojecten dit proces plaatselijk weer ruimte gegeven in o.a. hermeandering-projecten zoals bij de Geul in Limburg.

1.1.7 Depositie

Dat er sediment door erosie wordt losgemaakt in een stroomgebied hoeft niet te betekenen dat het ook het stroomgebied verlaat. Een gedeelte van het sediment zal worden afgezet in het gebied zelf. Het proces van sedimenttransport en -afzetting bepaalt hoeveel sediment het gebied verlaat. Toy et al. (2002) vonden dat op complexe hellingen meer dan 75% van het geërodeerde materiaal weer op de percelen zelf wordt afgezet. Depositie vindt op hellingen plaats in lokale depressies, op concave hellingvoeten of bij obstakels (bv. grasbanen, graften etc.). In stroomgebieden is er daarnaast ook nog een aantal andere plaatsen waar sedimentatie optreedt (bv. opvangbekkens, stroombedding, overstromingsgebieden). Het percentage van het losgemaakte sediment dat een stroomgebied verlaat neemt over het algemeen af bij groter wordend gebied. Depositie is een selectief proces, omdat het grove materiaal eerder afgezet wordt dan de fijne delen, wat resulteert in de afvoer van deze fijne delen uit het gebied.

1.1.8 Gevolgen

Watererosie kan on-site leiden tot verlies van de vruchtbare bovengrond (figuur 2), schade aan gewassen, belemmering van landbouwactiviteiten, hogere productiekosten en lagere opbrengst. Off-site kunnen er problemen zijn door wateroverlast (figuur 2), modderstromen en sedimentatie. Deze problemen beperken zich niet tot alleen de landbouwgrond, maar treffen juist vaak benedenstrooms gelegen infrastructuur en bebouwing.



Figuur 2

Links: On-site gevolgen bodemerosie (foto H.Winteraeken). Rechts: Off-site gevolgen bodemerosie: modder op straat en volgelopen kelders (foto F.Kwaad).

1.2 Winderosie

Winderosie treedt op wanneer (i) de bodem los, fijn verdeeld en droog is, (ii) wanneer de bodem vlak en kaal is en (iii) de wind sterk is. Hoewel deze condities vaak in aride gebieden voorkomen, heeft winderosie een groter

verspreidingsgebied. Funk et al. (2002) stellen dat winderosie een serieus probleem is in het noordoosten van Duitsland (figuur 3) doordat hoge wind-erosiviteit (in maart en april) samenvalt met zaaibedbereiding voor gewassen als suikerbieten en maïs. Andere inventarisaties in Europa tonen aan dat ongeveer 1 miljoen ha in het westelijk deel van Denemarken gevoelig is voor winderosie (Prendergast, 1983); ongeveer 170,000 ha in Zweden (Jönsson, 1985) en 97,000 ha in Nederland (Eppink en Spaan, 1989; Riksen en de Graaff, 2001).



Figuur 3

Winderosie in Noord-Duitsland (foto Geological Survey of Lower Saxony, Institute for Soil Technology, Bremen, Duitsland).

De belangrijkste factoren die de mate van winderosie bepalen zijn windsnelheid, bodem-eigenschappen en vegetatie condities (Fryrear en Bilbro, 1998). De erosieve kracht van wind is afhankelijk van de frictiesnelheid, die luchtweerstand aan het bodemoppervlak veroorzaakt. Luchtweerstand neemt toe bij hogere windsnelheid en met toenemende bodemruwheid. Bij erg ruwe bodemoppervlakken absorbeert de ruwheid veel van de luchtweerstand wat resulteert in kleinere erosiehoeveelheden bij hogere bodemruwheden (Troeh et al., 1990). Variabele windsnelheid en richting zijn effectiever in het eroderen van de bodem dan een constante wind. Analoog aan de erosie door water is er ook voor winderosie een drempel waar beneden er geen erosie optreedt. Deze drempel is afhankelijk van de bodem en de bodemoppervlakconditie. Verschillende factoren beïnvloeden de hoeveelheid materiaal dat geërodeerd kan worden. Ten eerste is dat de bodemweerstand, die afhankelijk is van de textuur en stabiliteit van de aggregaten. Zandige bodems zijn door de zwakke binding tussen de deeltjes meer gevoelig voor winderosie dan bodems met meer fijnere delen (lutum). Een tweede factor is de bodemruwheid, die over het algemeen de hoeveelheid winderosie doet afnemen. Een derde factor is het klimaat, dat de windsnelheid en het bodemvochtgehalte bepaalt. Alleen droge grond kan gemakkelijk worden opgenomen door de wind. Maar neerslag kan ook aggregaten uiteen doen vallen en de bodem afvlakken, waardoor deze bodem meer gevoelig voor winderosie wordt. Ook kan neerslag de bodem doen dichtslaan, waardoor deze bodem juist minder gevoelig wordt (Toy et al., 2002). Daarnaast speelt topografie, en

dan vooral de lengte van het gebied dat wordt blootgesteld aan de kracht van de wind, een belangrijke rol. Vegetatie is een effectieve bescherming tegen winderosie omdat het zorgt voor zeer lage windsnelheden aan het bodemoppervlak. Daarnaast kan vegetatie de erodibiliteit van de grond verminderen door de beworteling en door de toename van het organische stofgehalte van de bodem.

1.2.1 Deflatie

Deflatie is het losmaken en optillen van los materiaal door de wind waarna de bodemdeeltjes in transport gaan. Het kan resulteren in deflatielaagten ook wel uitgestoven laagte genoemd. De deflatie neemt af of stopt wanneer er geen verstufbaar materiaal meer is of het grondwater bereikt is. In het laatste geval kunnen er plaatselijk vennetjes ontstaan. Een aanzienlijk deel van de bovengrond kan op deze manier verdwijnen, er zijn zelfs hoeveelheden van 30 cm in een jaar gemeld voor akkerland (Troeh et al., 1990). Deeltjes tussen 0,1 en 0,15 mm zijn het meest gevoelig om losgemaakt te worden door de wind omdat kleinere delen meer cohesie hebben en grotere delen meer kracht nodig hebben om opgetild te worden (omdat ze zwaarder zijn).

1.2.2 Transport

Er zijn drie hoofdvormen van transport te onderscheiden: kruip, saltatie en suspensie. Bij kruip schuiven of rollen de grootste bodemdeeltjes (>0,5 mm) over het bodemoppervlak. De afstand die deeltjes op deze manier afleggen blijft meestal beperkt van enkele centimeters tot enkele meters (Sterk et al., 2001). Kleinere bodemdeeltjes (tussen 0,05 en 0,5 mm) worden getransporteerd in saltatie. Bij saltatie worden de losgemaakte bodemdeeltjes hoger opgetild en met de wind over een afstand van meegenomen waarna de deeltjes weer terug op de bodem vallen waarbij ze weer omhoog kunnen stuiteren of andere bodemdeeltjes in beweging brengen. Het effect is dat de deeltjes stuiterend over het bodemoppervlak bewegen. Het meeste transport via saltatie vindt binnen één meter boven de grond plaats (Sterk et al., 2001). Deze vorm van transport neemt af wanneer terreinruwheid of vegetatiebedekking of bodemvocht of de weg geblokkeerd wordt door obstakels of oppervlaktewater. Door de inslag van bodemdeeltjes kunnen ook de aggregaten uiteen vallen in fijnere deeltjes en kunnen de fijnere deeltjes < 0,2 mm (Morgan, 2005) opspringen. Door hun geringe omvang en gewicht kunnen ze door de wind tot grote hoogte meegenomen worden en spreken we van suspensie. De meest vruchtbare bodemdeeltjes kunnen tijdens een zandstorm op deze manier van de akkers verdwijnen. De zwaarste deeltjes zullen binnen een straal van enkele tientallen tot honderden meters weer afgezet worden. De fijnste deeltjes kunnen echter over enkele tot duizenden kilometers getransporteerd worden (Sterk et al., 2001). Over het algemeen kan men stellen dat bij een zandstorm 55 tot 72 procent van het transport via saltatie verloopt (Morgan, 2005).

1.2.3 Abrasie

Abrasie is het schuren van materiaal door wind waarin veel bodemdeeltjes worden meegevoerd. Dit proces wordt ook wel zandstralen genoemd. Zandstralen heeft het afsnijden van (jonge) planten tot gevolg en leidt tot de noodzaak voor herinzaai en opbrengst verliezen (Riksen en de Graaff, 2001) en kan zelfs leiden tot het afschuren van verf op gebouwen en auto's. Ook kan het bodemaggregaten en kluiten breken waardoor er weer meer fijn materiaal beschikbaar komt om meegevoerd te worden met de wind dat anders niet beschikbaar zou zijn geweest. Zandstralen wordt veroorzaakt door het in saltatie meegevoerde materiaal, wat zich hoofdzakelijk in de eerste meter lucht boven het bodemoppervlak bevindt. Het zandstralen zorgt er ook voor dat het meegevoerde materiaal zelf kleiner wordt (attrition).

1.2.4 Depositie

Het meegevoerde grove bodemmateriaal wordt over het algemeen niet ver van de bron getransporteerd en kan grote gevolgen hebben op de locatie waar het wordt afgezet. Het kan gewassen, wegen, sloten en erfafscheidingen bedekken. De kosten van maatregelen om deze depositie op te ruimen zijn vaak veel groter dan de schade veroorzaakt door de winderosie zelf (Troeh et al., 1990). Het fijne materiaal dat wordt meegevoerd wordt in stofwolken getransporteerd en reikt veel verder. Dit materiaal veroorzaakt geringe schade (zgn. zandregens), maar kan leiden tot overlast. In een studie in Noord-Duitsland en Noord-Nederland bleek dat in Nederland zowel de schade op het veld als de overlast door winderosie als aanzienlijk wordt ervaren, terwijl in Duitsland de impact van winderosie minimaal wordt bevonden (Riksen, 2004). Belangrijkste oorzaak van dit verschil in beleving zijn de windsingels die wegen en erven in Duitsland beschermen tegen wind en stofdepositie.

1.2.5 Gevolgen

Verstuiven leidt tot afname van het organisch stof gehalte, de vochthoudendheid, de chemische bodemvruchtbaarheid en de biologische activiteit (De Vries en Brouwer, 2006). Ook kunnen meststoffen, bestrijdingsmiddelen, ziekten (zoals Q-koorts) en onkruiden zich verspreiden, kan schade optreden aan jonge gewassen (blootstuiven dan wel onderstuiven), en kunnen sloten plaatselijk dichtstuiven. Dit leidt tot extra kosten, en schade aan de gewassen kan ook tot oogstverlies leiden, of kan zelfs herinzaai noodzakelijk maken. Daarnaast kan vruchtbare bovengrond verloren gaan, en kan de bodemstructuur aangetast worden (Riksen et al., 2003). Het materiaal dat door de wind getransporteerd wordt kan ook schade veroorzaken aan bv. machines en gebouwen (Riksen et al., 2003). Stof kan ook tot overlast leiden buiten de agrarische gebieden, bv. doordat het huizen binnendringt, doordat gezondheidsproblemen kunnen ontstaan door het inademen van fijn stof (Wagelmans, 2002) en doordat het meegevoerde stof relatief hoge concentraties bevat aan organische stof, herbiciden, pesticiden en meststoffen die elders vervuiling veroorzaken (Van Kerckhoven et al., 2009).

2 Kwantificeren van erosie

Over het algemeen gesproken kan erosie op twee manieren gekwantificeerd worden, namelijk door metingen en door modellering. Dit geldt zowel voor watererosie als voor winderosie, maar in het huidige rapport wordt alleen aandacht besteed aan het kwantificeren van winderosie. Deze twee methoden zullen afzonderlijk besproken worden, al moet wel bedacht worden dat modelleren nooit meten kan vervangen, aangezien voor het goed modelleren ook goede kwaliteit meetgegevens nodig zijn.

Het meten van bodemerosie is van vitaal belang om de ernst van erosie te bepalen, om ons begrip van erosieprocessen te vergroten, en om maatregelen te ontwerpen die effectief zijn om erosie te bestrijden (Toy et al, 2002). Het meten van erosie behelst vaak ook het meten van andere parameters, die van invloed zijn op erosie. Daarbij valt bv. te denken aan hoeveelheid neerslag, windsnelheid, vochtgehalte van de bodem en karakteristieken van de bodem en van de begroeiing. Deze metingen worden hier niet besproken. Meettechnieken verschillen niet alleen wat betreft het erosieproces dat ze meten, maar zijn ook verschillend afhankelijk van ruimtelijke en temporele schaal.

Er bestaan zeer veel verschillende modellen voor het simuleren van bodemerosie. Deze modellen kunnen op verschillende manieren onderverdeeld worden. Welk model in een bepaalde situatie het meest geschikt is hangt in hoge mate af van het doel wat men heeft met modelleren (Morgan en Quinton, 2001), en is verder afhankelijk van allerlei andere factoren, zoals beschikbaarheid van data, gebiedskarakteristieken en schaal. Enkele belangrijke criteria om modellen in groepen te kunnen verdelen zijn de volgende:

- De mate waarin kennis van erosieprocessen is opgenomen in het model. Als dit in hoge mate is gebeurd spreken we van fysisch-deterministische modellen, en als het nauwelijks is gebeurd van empirische modellen. Fysisch-deterministische modellen kunnen in principe gebruikt worden voor andere omstandigheden dan die waar ze voor ontwikkeld zijn (al valt dit in de praktijk vaak tegen en is kalibratie vrijwel altijd nodig). Empirische modellen kunnen alleen gebruikt worden voor de omstandigheden waarvoor ze ontwikkeld zijn. Fysisch-deterministische modellen geven echter niet altijd betere resultaten omdat de proceskennis niet altijd voldoende was, en ook omdat ze aanzienlijk meer invoergegevens nodig hebben dan empirische modellen. Deze invoergegevens zijn niet altijd beschikbaar of kunnen van lage kwaliteit zijn. Onzekerheid in invoergegevens werkt door naar onzekerheid in modeluitkomst en is daarom groter voor meer complexe modellen (Brazier et al., 2000; Jetten et al., 2003). Aan de andere kant zijn fysisch-deterministische modellen wel het enige type model dat kan helpen om proceskennis te vergroten, en geven ze vaak ook meer informatie dan empirische modellen, zoals informatie over de ruimtelijke en temporele verdeling van erosie (Morgan en Quinton, 2001).
- Een ander onderscheid is dat in modellen die zich richten op het simuleren van één event (zoals een heftige regenbui) en modellen die langere tijdsperioden simuleren. Wat er tussen events gebeurt is daardoor niet relevant voor event-based modellen, zolang de initiële condities maar correct worden opgegeven. Continue modellen hebben meer gegevens nodig omdat ze vaak ook bv. gewasgroei, verdamping en seizoensale verandering in bodemkarakteristieken simuleren.
- Een derde onderverdeling is tussen zogenaamde gelumpte en gedistribueerde modellen. Gelumpte modellen gebruiken slechts een zeer gering aantal ruimtelijke elementen, en geven bv. in het geval van watererosie alleen een voorspelling van de totale hoeveelheid grond die het modelgebied verlaat. Gedistribueerde modellen gebruiken vaak duizenden of tienduizenden pixels in de simulatie, en zijn dan ook in staat om voorspellingen van erosie te doen voor al die pixels, zodat er een ruimtelijk beeld van de erosieproblematiek ontstaat. Gedistribueerde modellen hebben wel invoergegevens nodig voor alle pixels apart.

- Schaal van het model is ook belangrijk, mede omdat er op verschillende schalen verschillende erosieprocessen actief zijn. Voor watererosie bijvoorbeeld treedt splash erosie op de kleinste schalen op, terwijl gully erosie alleen optreedt voor grotere gebieden. Samenhangend met het voorgaande kan ook het belang van bepaalde processen afhangen van de schaal. Op zeer kleine plots bv. is splash of rill erosie dominant, terwijl op stroomgebiedsschaal deze processen vaak verwaarloosbaar zijn, en bv. gully en oevererosie juist heel belangrijk zijn. Er dient dus een model gekozen te worden dat relevant is voor de schaal waarop het te modelleren proces optreedt. Over het algemeen betekent dit dat naarmate een groter gebied gemodelleerd wordt er minder proceskennis meegenomen wordt (Kirkby, 1998).

Zoals al gezegd is één van de belangrijkste factoren in de keuze van een model het doel wat men met modelleren heeft. Over het algemeen kan gesteld worden dat men het eenvoudigste model moet kiezen wat voldoet aan de doelstelling. Als men bv. een jaarlijks gemiddelde erosiehoeveelheid wil weten voor een bepaalde plot of gebied, en men niet geïnteresseerd is in wat er binnen zo'n plot of gebied gebeurt, dan is een empirisch gelump model de beste keuze. Als men echter informatie wil voor individuele events, of voor verschillende delen van het modelgebied, dan zijn meer complexe event-based gedistribueerde modellen nodig.

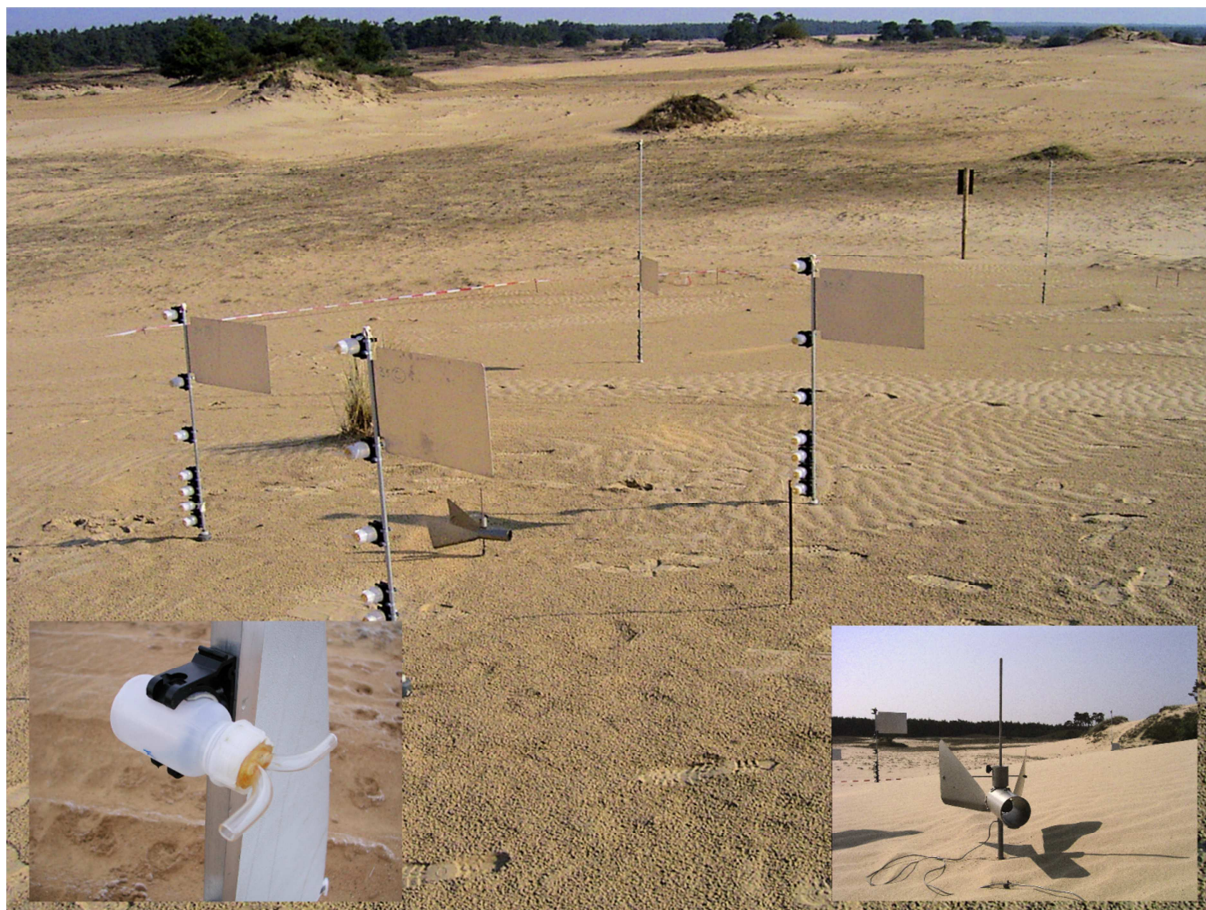
2.1 Meten van winderosie

Meten van winderosie kan zowel in windtunnels als in het veld worden gedaan.

In windtunnels kan onder gecontroleerde omstandigheden onderzoek worden gedaan. Zo is in het verleden op PPO-locatie 't Kompas gemeten aan erosie (K.H. Wijnholds, pers.med.). Deze proeven dienden vooral om verschillende producten ter voorkoming van erosie te testen. Er werd wind opgewekt door middel van twee grote ventilatoren, en aan het eind van de tunnel werd het geërodeerde zand opgevangen met een opvangunit met stofzuiger. De hoeveelheid opgevangen zand is een maat voor de stuifgevoeligheid. Weinig zand t.o.v. de onbehandelde situatie betekent een goede werking van het product. Zulke proeven zijn geschikt om bepaalde aspecten van winderosie in isolatie te onderzoeken, maar kunnen geen rekening houden met alle factoren die in het veld de mate van winderosie bepalen.

Winderosie kan in het veld gemeten worden door te meten hoeveel bodem (uitgedrukt als diepte) er verwijderd of bijgekomen is, of door de hoeveelheid materiaal die verplaatst wordt te meten.

Om te meten hoeveel bodem er verwijderd of afgezet is wordt vaak gebruik gemaakt van erosiepinnen. Deze pinnen worden in de grond gestoken, en de lengte van het deel dat boven de grond uitkomt wordt periodiek gemeten. Rixsen en Goossens (2007) bv. gebruikten pinnen van 50 cm lang, met een doorsnede van 5 mm om erosie te meten in het Kootwijkerzand. De lengte van de pinnen werd wekelijks geregistreerd. Ook hier hangt de meetfrequentie af van het doel van de metingen. Om effecten in relatie met andere procesparameters te kunnen bekijken zal een hogere meetfrequentie nodig zijn dan wanneer men alleen geïnteresseerd is in het verloop van de sedimentbalans op jaarbasis. In het laatste geval wordt ook wel gebruik gemaakt van laser altimetrie, een techniek waarbij een vliegtuig of helikopter met een laserstraal het aardoppervlak aftast. De meting van de looptijd van de laserreflectie en van de stand en positie van het vliegtuig resulteren samen in een heel nauwkeurige meting van de hoogte. Een voorbeeld hiervan zijn de Jarkus raaien (<http://home.wxs.nl/~kwant017/wz/kustkaarten.htm>) langs de Nederlandse kust die door RWS jaarlijks worden ingemeten.



Figuur 4

Voorbeelden van apparatuur die gebruikt wordt voor het meten van winderosie in het Kootwijkerzand. Foto's M. Riksen.

Om in het veld te meten hoeveel materiaal er verplaatst is bestaan verschillende methoden, o.a. om de verschillende winderosieprocessen te kunnen meten. Erosieplots worden gebruikt, maar in tegenstelling tot watererosie zijn zulke plots vaak rond, aangezien wind van alle kanten kan komen. Een bijkomend probleem is dat de lucht die de plot binnenkomt vaak ook al sediment bevat (Toy et al., 2002), wat niet het geval is bij plots voor het meten van watererosie, ten minste als die plots correct ontworpen zijn. Om deze redenen is er een aantal meetinstrumenten nodig, om het sedimentgehalte van de lucht te kunnen meten zowel waar de lucht de plot binnenkomt als waar de lucht de plot weer verlaat, ongeacht de richting waaruit de wind op een bepaald moment waait. Daar komt nog bij dat sedimentconcentraties op verschillende hoogten gemeten moeten worden omdat er een vertikaal profiel zit in de sedimentconcentratie. Door de wind verplaatst sediment kan opgevangen worden met zogenaamde sedimentvallen. Deze sedimentvallen kunnen zowel horizontaal (voor kruip en saltatie) als verticaal (voor saltatie en suspensie als functie van de hoogte) geplaatst worden. Verticale traps hebben een mechanisme dat er voor zorgt dat de val zich oriënteert afhankelijk van de windrichting. Figuur 4 laat voorbeelden zien van apparatuur die door Riksen en Goossens (2007) werd gebruikt om winderosie in het Kootwijkerzand te meten. Ook is er meetapparatuur beschikbaar om winderosieactiviteit in de tijd te registreren. De Saltifoon is hier een goed voorbeeld van. Dit apparaat registreert de inslagen van bodemdeeltjes op een membraam met een microfoon, voor een gedetailleerde beschrijving zie Spaan en de Abele (1991).

2.2 Modelleren van winderosie

Voor winderosie zijn er minder modellen ontwikkeld dan voor watererosie. Het eerste winderosiemodel dat verscheen was WEQ (Wind Erosion Equation) (Woodruff en Siddoway, 1965). Dit model vertoont gelijkenis met het zeer bekende watererosiemodel USLE, omdat het net als USLE erosie berekent als een functie van een aantal factoren die verondersteld worden van invloed te zijn op erosie. Voor WEQ zijn dit de volgende factoren: erodibiliteit, bodemruwheid, klimaat, veldlengte en bodembedekking. In tegenstelling tot USLE kunnen deze factoren niet met elkaar vermenigvuldigd worden omdat ze elkaar onderling beïnvloeden. Van Pelt en Zobeck (2002) vonden dat WEQ over het algemeen winderosie met zo'n 50% onderschatte over perioden van verschillende maanden. De voorspellingen konden echter aanzienlijk verbeterd worden door kalibratie voor de lokale omstandigheden. Van Kerckhoven et al. (2009) achtten WEQ het meest geschikte winderosiemodel voor Vlaanderen en vonden dat het model grootschalige erosiepatronen correct voorspelde. Zo werden hogere erosiesnelheden voorspeld voor de zandgronden in de Kempen, en lagere voor leemgronden. Een validatie door middel van interviews met boeren bevestigde dat de patronen correct voorspeld werden, al kon de absolute voorspelling niet gevalideerd worden.

RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) is een empirisch model om winderosie op jaarbasis te schatten (al zijn kortere periodes ook mogelijk), en is gebaseerd op een winderosie model voor individuele events (Zobeck et al., 2001). Net als WEQ gebruikt het een aantal factoren: wind, erodibiliteit, verkorsting, ruwheid en bodembedekking. Zobeck et al. (2001) hebben RWEQ gevalideerd voor individuele events en vonden dat RWEQ de neiging heeft om transportcapaciteit te onderschatten en kritische veldlengte te overschatten. Ze vonden echter wel significante relaties tussen waargenomen en voorspelde transportcapaciteit en bodemverlies, wat laat zien dat RWEQ wel potentieel heeft. RWEQ is ook gebruikt om te bepalen of residuen die op het veld achterbleven voldoende bescherming bodem tegen winderosie, of dat additionele maatregelen nodig waren (Fryrear en Bilbro, 1998).

WEPS (Wind Erosion Prediction System) is een meer fysisch-deterministisch model dan RWEQ en heeft dan ook additionele invoergegevens nodig. WEPS gebruikt een tijdstap van één dag en werkt op veldschaal (Wagner en Tatarko, 2001). Het bestaat uit verschillende submodellen en simuleert ruimtelijk en temporele variabiliteit van bodem, gewas, residuen en bodemverlies/depositie. Het geeft aparte voorspellingen voor saltatie/creep en voor PM10 (Hagen, 2001; Tatarko en Wagner, 2002). WEPS kan ook gebruikt worden voor individuele events (dagen) door het submodel voor erosie te gebruiken los van de rest van het model (Tatarko en Wagner, 2002). Hagen (2001) heeft het model gevalideerd voor 24 events op een akker bij Big Spring, Texas, en vond een R-kwadraat van 0.65 tussen waargenomen en voorspeld bodemverlies. Funk et al. (2002) valideerden het model voor 21 events in Noordoost Duitsland en vonden een R-kwadraat van boven de 0.9. WEPS is onafhankelijk van WEPP (voor watererosie) ontwikkeld, maar men streeft er wel naar om beide modellen op elkaar af te stemmen (Fox et al., 2001).

Gregory en Darwish (2001, 2002) hebben het TEAM (Texas Tech Erosion Analysis Model) ontwikkeld in een poging om een winderosie-model te maken dat toepasbaar is voor alle milieus waarin winderosie voorkomt. Volgens hen zijn de modellen die ontwikkeld zijn door USDA (WEQ and WEPS) alleen geschikt voor akkerland en niet voor bv. woestijnen en mijnstortplaatsen. TEAM is een fysisch-deterministisch model voor individuele events.

WEELS (Wind Erosion on European Light Soils) voorspelt de ruimtelijke spreiding van winderosie, en heeft een modulaire structuur. Er zijn modules voor wind, winderosiviteit, bodemvochtigheid, bodemerodibiliteit, bodemruwheid en landgebruik. Maatregelen tegen winderosie worden gesimuleerd door middel van een reductiefactor, zoals ook in WEQ en RWEQ.

3 Nederlandse situatie

3.1 Erosie in Nederland

Erosie is in het grootste deel van Nederland niet zo'n groot probleem, maar er zijn regio's binnen Nederland waar wind- en watererosie wel degelijk optreden (Kwaad et al., 2006) en tot schade en overlast leiden.

3.1.1 Watererosie

Hack-ten Broeke et al (2009) combineerden bodemgebruik en hellingshoek om tot een kaart te komen van gebieden die gevoelig zijn voor watererosie (figuur 5). Aannemend dat erosie vooral optreedt op akkerland, en op hellingshoeken van meer dan 2%, vonden zij dat vooral het heuvellandschap van Zuid-Limburg en het heuvelgebied rond Groesbeek gevoelig zijn voor watererosie. Daarnaast zijn er in figuur 5 enkele verspreide locaties waar er ook akkerland is op een helling van meer dan 2%, zoals op de flanken van de stuwwallen en op de oostelijke flank van de Hondsrug. Hierbij moet wel bedacht worden dat de kaart een gevoeligheid voor erosie geeft, wat nog niet hoeft te betekenen dat erosie ook daadwerkelijk een probleem is. Echter, Zuid-Limburg en Groesbeek zijn ook de gebieden waarvoor eerdere studies (zoals Eppink en Spaan, 1982 en Stolte et al., 2005) aangaven dat watererosie er een probleem is.

In Nederland heeft ongeveer 600.000 ha van het landoppervlak een helling van meer dan 2% en is als zodanig gevoelig voor watererosie. Stolte et al. (2000) vonden dat een deel van de neerslag in Nederland niet direct infiltreert, in afhankelijkheid van bodemtype, initieel bodemvochtgehalte en neerslagkarakteristieken. Het deel dat niet infiltreert zal afstromen via het bodemoppervlak naar sloten en beken of als plasvorming op het bodemoppervlak achterblijven en later alsnog infiltreren. Het percentage oppervlakteafvoer varieerde van 6% voor droge gronden bij een bui met een frequente herhalingsperiode tot 60% voor initieel natte gronden bij een bui met een lage herhalingsperiode. De werkelijke oppervlakteafvoer hangt onder andere af van lokaal micro- en macroreliëf, van bodemtype en van het landgebruik en de landbewerkingsmethoden.

Bodemgebruik en gebieden met hellingen



Figuur 5

Verspreiding van hellingen in Nederland volgens hoogtekaart AHN, gecombineerd met bodemgebruik (Hack- ten Broeke et al., 2009).

Er zijn verschillende ontwikkelingen die resulteren in een toenemende gevoeligheid voor overstromingen ('muddy floods'). Evrard et al. (2007) noemen bijvoorbeeld voor de lössgebieden in België: schaalvergroting, mechanisatie, omzetting van grasland in akkerland en de uitbreiding van zomergewassen ten koste van wintergranen. Deze ontwikkelingen zijn ook van toepassing op Nederland, zoals o.a. beschreven door Winteraeken en Spaan (2010), die daarnaast nog het verwijderen van graften en heggen noemen. Deze ontwikkelingen hebben geresulteerd in het vaker voorkomen van overstromingen.

Zuid-Limburg

Zo'n 40.000 ha in Zuid-Limburg ondervindt schade door erosie (Kwaad et al., 1998). Studies in dit gebied tonen aan dat in kleine stroomgebieden met een agrarisch gebruik op buibasis een afvoerpercentage van bijna 50% kan worden bereikt (De Roo et al., 1996; Van Dijk en Kwaad, 1996; Stolte et al., 1999). De lössgronden zijn erg gevoelig voor bodemerosie vanwege hun textuur, hun lage organischstofgehalte en hun zwakke structuur (Spaan et al., 2010). Ook zijn ze erg gevoelig voor verslemping, waardoor afvoer wordt vergroot en het risico op erosie toeneemt. Vanwege de vruchtbare lössgronden wordt er echter wel op grote schaal landbouw bedreven, waarbij mais, granen, suikerbieten en aardappelen de meest voorkomende gewassen zijn (Winteraeken en Spaan, 2010). Daarnaast zijn de hellingen in Zuid-Limburg aanzienlijk en kunnen er heftige buien voorkomen vooral in de lente en de zomer. Omdat de dorpen veelal in de dalen liggen treden er regelmatig overstromingen op, waarbij tevens veel modder wordt afgezet (zogenaamde 'muddy floods'). Dit type overstromingen komt ook in andere delen van Europa voor waar er lössgronden zijn, zoals in België, Frankrijk, Duitsland en Engeland (Evrard et al., 2007). Naast deze muddy floods treden ook rilerosie en geulerosie op, wat ook in het aangrenzende Belgische Lössgebied belangrijke erosieprocessen zijn (Verstraeten et al., 2006). Het totale bodemverlies per bui kan in Zuid-Limburg oplopen tot 1,3 ton/ha. Lange-termijn studies hebben aangetoond dat het jaarlijkse bodemverlies ongeveer 14 ton/ha is (De Roo, 1991). Een inventarisatie in het zuidelijk lössgebied leverde in totaal meer dan 300 locaties op waar mogelijke schade door watererosie kan optreden (Schouten et al., 1985), maar de auteurs zelf melden dat er bij een meer gedetailleerde inventarisatie waarschijnlijk nog honderden punten toegevoegd moeten worden aan deze lijst. In deze studie hebben lokale gemeenten een schatting gemaakt van hun jaarlijkse kosten als gevolg van erosie die konden oplopen op tot bijna € 500.000 per gemeente. Kosten van voorziene investeringen om schade te voorkomen liepen op tot meer dan € 10 miljoen voor de hele regio. Van Eck et al. (1995) concludeerden op basis van hun inventarisatie dat de jaarlijkse kosten voor lokale gemeenten ongeveer € 800.000 bedragen, terwijl Geelen (2006) een ruwe schatting noemt van € 950.000 per jaar, gebaseerd op data uit de jaren 80 van de 20^e eeuw. Evrard et al. (2007) schatten dat de totale kosten als gevolg van overstromingen in de Belgische lössgebieden 16 - 172 miljoen euro per jaar bedragen, terwijl Verstraeten et al (2006) tot een schatting van 60 - 95 miljoen euro per jaar komen voor de gecombineerde kosten van gewasschade, muddy floods en uitbaggeren van rivieren en opvangbekkens.

Groesbeek

Rond Groesbeek komt net als in Zuid-Limburg löss voor. In het hellinggebied ten zuiden van Groesbeek ondervindt men regelmatig overlast door watererosie. Gevolgen zijn water- en modderstromen en schade aan landbouwgewassen (Nelen & Schuurmans, 2008). De afwatering van het gebied loopt direct naar de bebouwing van Breedeweg, waardoor de overlast daar vaak groot is (Stolte et al., 2002). Ook op andere punten binnen de gemeente Groesbeek treedt wateroverlast op na heftige regenval (Nelen & Schuurmans, 2008).

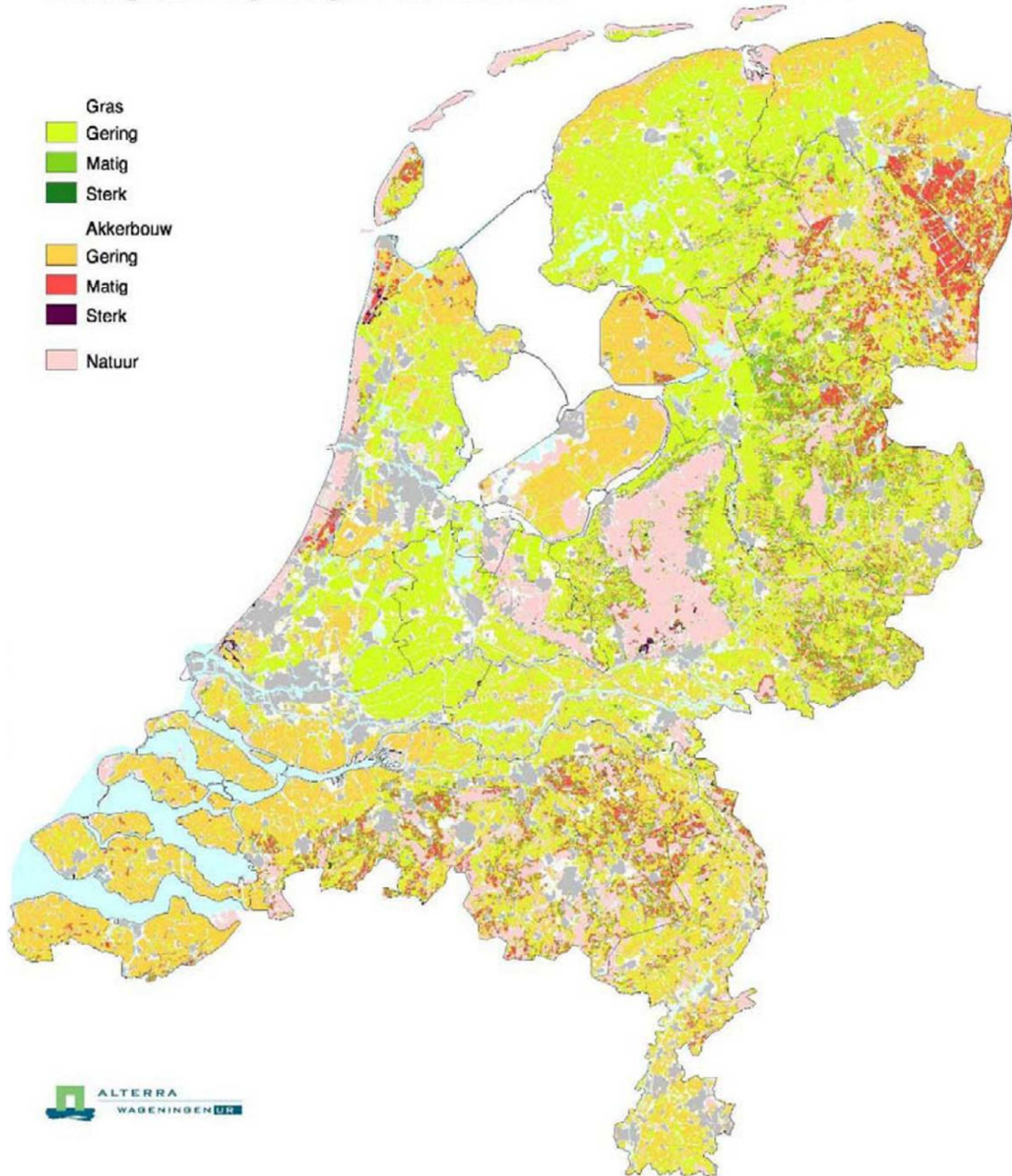
Overige gebieden

Figuur 5 laat zien dat er vooral in de provincies Gelderland, Drenthe, Overijssel en Utrecht enkele locaties zijn die gevoelig zijn voor het optreden van watererosie. Deze erosiegevoelige gebieden in andere delen van Nederland zijn te vinden waar akkers voorkomen op relatief steile hellingen, zoals op de flanken van de stuwwallen (zie figuur 5 en figuur 9). Hoewel het grootste deel van de stuwwallen natuurgebied is, zijn er toch aan de randen van de stuwwallen ook akkers te vinden die een niet te verwaarlozen helling hebben. De Vries en Brouwer (2006), bijvoorbeeld, vonden dat zo'n 7000 ha akkerland in Drenthe risico op bodemerosie door water loopt. Deze 7000 ha bevonden zich vooral op de Hondsrug en Havelterberg. De meeste van deze overige erosiegevoelige gebieden hebben zandgronden en diepe grondwaterspiegels, waardoor infiltratiesnelheid groot zal zijn en de kans op verzadiging klein. Hiermee is kans op het daadwerkelijk optreden van erosie ook gering; erosie is alleen te verwachten bij extreme buien.

3.1.2 Winderosie

Hack-ten Broeke et al. (2009) maakten een kaart van stuifgevoeligheid (volgens methode Ten Cate et al.; 1995) en combineerden die kaart met bodemgebruik (figuur 6). In Nederland zijn vooral de Veenkoloniën in Groningen en Drenthe gevoelig voor winderosie (Maring et al., 2008), als ook de zandgebieden, vooral in Noord-Brabant, Limburg en Drenthe. Kleinere gebieden die ook gevoelig zijn voor winderosie zijn bloembolpercelen langs de duinen en akkers in enkele polders (Figuur 6), zoals in de Noordoostpolder, Wieringermeer en op Texel. Het totale oppervlak akkerland dat in Nederland matig of sterk gevoelig is voor winderosie bedraagt volgens de gegevens in Figuur 6 194.875 ha, waarvan 4681 ha sterk gevoelig is. Winderosie treedt daarmee potentieel in een aanzienlijk groter gebied op dan watererosie, aangezien watererosie vooral optreedt op 40.000 ha lössgrond in Zuid-Limburg (Kwaad et al., 2006). Omdat verstuiving optreedt bij kale bodem is het alleen een probleem op akkerland, en vooral in de periode maart-april, wanneer de velden net bewerkt zijn (Goossens, 2004), en vooral bij oostenwind omdat die vaak droger is dan wind uit andere richtingen (Eppink, 1982). Ook de landbouwbewerkingen zelf, zoals ploegen en oogsten, kunnen een bijdrage leveren aan winderosie als ze worden uitgevoerd onder droge en winderige omstandigheden (Van Kerckhoven et al., 2009). In Drenthe treedt er vooral winderosie op in aardappelvelden en bietenvelden (Wagelmans, 2002). Voor winderosie is het, net als voor watererosie, van belang om een onderscheid te maken tussen erosiegevoeligheid en erosie zelf. Zo is in Drenthe winderosie de laatste jaren niet als een probleem ervaren (Maring et al., 2008). Verstuiving in natuurgebieden is in figuur 6 buiten beschouwing gelaten omdat het stuiven van zand in natuurgebieden een factor kan zijn die bijdraagt aan het instandhouden of vormen van het landschap in overeenstemming met de natuurdoelen. Dit is bv het geval op de meeste stuwwallen, zoals de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug, maar ook in de duinen. In deze gebieden worden dan ook geen maatregelen genomen om verstuiven tegen te gaan, maar soms zelfs om het te bevorderen. In het verleden was er in sommige van deze gebieden wel een serieus winderosie probleem. Spaan et al. (2006) beschrijven de geschiedenis van erosieproblemen en erosiebestrijding in gebieden zoals de Veluwe.

Bodemgebruik en gevoeligheid voor verstuiven



Figuur 6

Stuifgevoeligheid, bepaald op basis van de bodemkaart 1:50.000, gecombineerd met bodemgebruik (Hack-ten Broeke et al., 2009).

Schattingen van de mate van winderosie geven aan dat winderosie van enige omvang (vijf tot tien dagen per jaar) één keer per drie tot vier jaar optreedt en ernstige winderosie met meer dan tien stofdagen per jaar een keer in de vijftien jaar (Eppink en Spaan, 1989). Eppink (1982) schatte dat voor die periode de directe kortetermijn winderosieschade ongeveer negen miljoen euro per jaar bedroeg. Op basis van een inventarisatie bij boerenbedrijven in Exloërmond concludeerden Riksen en De Graaff (2001) dat winderosie significante schade berokkent als gevolg van afsnijden van gewas, verlies van zaailingen en het opvullen van sloten met

zand (figuur 7). Zij concludeerden dat voor de suikerbieten- en koolzaadteelt de kosten per hectare ongeveer € 500 per vijf jaar bedragen.



Figuur 7

Opvullen van een sloot met zand door winderosie (foto Geological Survey of Lower Saxony, Institute for Soil Technology, Bremen, Duitsland).

Volgens Riksen et al. (2003) is het gevaar van winderosie in Noordwest-Europa, en daarmee ook in Nederland, sinds de jaren 50 toegenomen door veranderingen in management, zoals intensivering, grotere percelen, intensiever gebruik van machines en het verwijderen van heggen. Sinds de jaren 90 is het probleem in Nederland echter afgenomen door zowel erosiebestrijdingsmaatregelen als door veranderd landgebruik, al dan niet onder invloed van regionale verordeningen. Volgens Kuhlman et al. (2010) is het aannemelijk dat in Nederland de off-site schade veroorzaakt door winderosie aanzienlijk groter is dan de on-site schade. Dit schrijven zij vooral toe aan de gevolgen die fijnstof in de lucht heeft voor de volksgezondheid. Gebaseerd op data van Chardon en Van der Hoek (2002) schatten zij dat 7-15% van alle fijnstof afkomstig is van winderosie, of wel 10-20 kiloton fijnstof per jaar.

Veenkoloniën

Van alle gebieden in Nederland waar winderosie een probleem is, is het probleem het grootst in de Veenkoloniën. De gronden van het veenkoloniale gebied bestaan uit zand met een lutumarme bouwvoor. Weliswaar is het organisch stof gehalte tussen 5 en 15%, maar dit betreft veenresten die inert zijn en weinig binding geven aan het zand (Wagelmans, 2002; K.H. Wijnholds, pers.med.). Hierdoor vallen de kluiten snel uiteen onder invloed van regen en wind. Het percentage organische stof in de loop van de tijd afgenomen doordat mest vervangen is door kunstmest (Spaan et al., 2006) en door een intensief bouwplan. Vanwege de bodemeigenschappen komen aardappels en suikerbieten veel voor. De grondbewerking die voor deze gewassen nodig is verhoogt de kans op winderosie, en ook de gewassen zelf bieden weinig bescherming tegen

winderosie (Wagelmans, 2002). 50 jaar geleden werden er meer verschillende gewassen verbouwd, vooral granen en wintergewassen, en was er ook meer grasland, zodat het erosiegevaar geringer was (Boersema en Procé, 1986). Naast het type gewas zijn ook de grootte van de velden en het open karakter van het landschap factoren die het gebied gevoelig maken voor winderosie. Ernstige verstuiving treedt in Drenthe ongeveer eens in de 3-5 jaar op (Boersema en Procé, 1986; Wagelmans, 2002), waarbij de hoeveelheid verplaatste grond in zeer ernstige stuifjaren op kan lopen tot 50 ton/ha (Boersema en Procé, 1986). Boersema en Procé (1986) schatten dat de jaarlijkse kosten voor opbrengstderiving, herinzaai, onderhoud van sloten en wegen en verlies van bodemvruchtbaarheid voor de Veenkoloniën bij elkaar zo'n 7.5 miljoen euro per jaar bedragen. Deze schatting is exclusief eventuele kosten die gepaard gaan met bv. vervuiling en gezondheidsproblemen die het gevolg zijn van winderosie.

De afgelopen jaren was winderosie in de Veenkoloniën relatief gering, maar in 2010 was er sprake van ernstige verstuiving. Dit was vooral het gevolg van de weersomstandigheden; door het koude voorjaar groeiden de bieten langzaam en was de bedekkingsgraad laag, terwijl de windrichting N/NW was, wat precies in de lengterichting van de percelen is (K.H. Wijnholds, pers.med.). Ook speelde mee dat sinds begin 2010 het in dit gebied niet meer is toegestaan om drijfmest te gebruiken ter bestrijding van winderosie (zie H3.3.2). Als gevolg van de verstuiving in 2010 moest een deel van de bieten worden overgezaaid.

Brabant en Limburg

De bodems zijn zandig, en door een diepe grondwaterstand in combinatie met een afgenomen bescherming tegen winderosie (verwijdering heggen, windsingels etc.) zijn ze erg gevoelig voor winderosie, vooral daar waar asperges verbouwd worden (Eppink en Spaan, 1989). Al in de jaren 40 van de 20^e eeuw werd winderosie in deze streken als een belangrijk probleem gezien, en vanaf ongeveer 1950 worden er al maatregelen genomen (Eppink en Spaan, 1989). Door deze maatregelen wordt winderosie niet langer als een ernstig probleem gezien in dit gebied.

Bollenstreek

Een deel van de bodems die gebruikt worden voor het verbouwen van bloembollen zijn zandig, zijn gedeeltelijk door mensen gemaakt door het afgraven van duinen of door het opbrengen van zand en zijn daardoor gevoelig voor winderosie (Eppink en Spaan, 1989). Waar bloembollen worden verbouwd op niet zandige gronden is er slechts een gering risico op erosie.

Overige gebieden

Figuur 6 laat zien dat er nog enkele gebieden zijn die gevoelig zijn voor winderosie, zoals delen van de Noordoostpolder, delen van Noord-Holland en de polder Eierland op Texel. Het betreft over het algemeen grote vlakke gebieden met een open karakter.

3.2 Mogelijke maatregelen

Er bestaat een groot aantal mogelijke maatregelen om erosie door water en wind tegen te gaan. Welke het meest toepasbaar zijn hangt af van de specifieke situatie, en wordt bepaald door biofysische factoren in combinatie met socio-economische factoren. Voor de Nederlandse situatie is er al een aanzienlijke hoeveelheid werk verricht wat betreft het beschrijven van maatregelen die vanuit technisch oogpunt geschikt zijn om erosie door water en wind tegen te gaan. Deze maatregelen worden vaak onderverdeeld in teeltmaatregelen en inrichtingsmaatregelen. In deze paragraaf worden maatregelen beschreven die gebruikt zouden kunnen worden in Nederland of die aangeraden worden voor gebruik. In paragraaf 3.3 wordt besproken welke maatregelen er tot nu toe daadwerkelijk gebruikt zijn in Nederland.

3.2.1 Watererosie

Het bestrijden van watererosie richt zich op (i) het verlagen van de snelheid van afstromend water en (ii) het vasthouden van water in het gebied. Het bestrijden van overlast van watererosie wordt bereikt door het aanleggen van retentiebekkens. Door een combinatie van beheers- en inrichtingsmaatregelen zijn de oorzaken en gevolgen van watererosie in Nederland voor een groot deel te beperken (De Roo et al., 1995, Stolte et al., 1999). Overlastbestrijding wordt als een belangrijker reden gezien om maatregelen te treffen dan aantasting van de productiefunctie van de bodem (Maring et al., 2008) en off-site effecten zijn meestal groter dan on-site effecten (Spaan et al., 2010).

Sinds de jaren 80 van de 20^e eeuw krijgt watererosiebestrijding in Nederland meer aandacht, vooral in Zuid-Limburg. Om enkele voorbeelden te noemen: Schouten et al (1985) gaven een overzicht van erosieproblematiek in Zuid-Limburg en noemden een aantal mogelijke maatregelen. Kwaad en Van Mulligen (1991) en Kwaad et al (1998) onderzochten welk effect verschillende teeltsystemen van mais hebben op erosie. De Roo et al. (1995) bespraken uitgebreid de erosieproblematiek, voerden metingen uit op verschillende schaalniveau's en beschreven het LISEM-model (Limburg Soil Erosion Model) dat speciaal voor het simuleren van bodemerosie in Limburg is ontwikkeld. Zij adviseerden najaarsbewerking (bv. stoppelbewerking met vastetandcultivator) om erosie tijdens de winter te voorkomen, en het opbrengen van stro na inzaai van het hoofdgewas om erosie tijdens de zomer te voorkomen. Ook grasstroken en direct zaai bleken effectief. Meer recent beschreef Geelen (2006), in het kader van het Interregproject Erosiebestrijding, een aantal maatregelen die getroffen zouden kunnen worden in Zuid-Limburg en in de Vlaamse Lössgebieden. Deze maatregelen betreffen zowel teeltmaatregelen (gewaskeuze, aanvullende bodembedekking, grondbewerking en bemesting) als inrichtingsmaatregelen (beperken snelheid afstroming, watergeleiding en tijdelijke opvang) (tabel 1). Van Essen et al. (2006) verrichtten via enquêtes onderzoek naar de mate waarin maatregelen geaccepteerd worden door de boeren in Zuid-Limburg en in de Vlaamse lössgebieden en concludeerden dat subsidies een grote rol spelen bij acceptatie. Niet-kerende grondbewerking en het gebruik van bodembedekkers werden als de meest haalbare opties gezien. Ze merkten ook op dat de Nederlandse boeren zich meer bewust leken van het erosieprobleem dan hun Belgische collega's.

Tabel 1

Samenvatting van door Geelen (2006) besproken maatregelen tegen erosie.

Teeltmaatregelen		Inrichtingsmaatregelen	
Gewaskeuze	Ander landgebruik Ander voedergewas Ander akkerbouwgewas	Beperken snelheid afstroming	Contourbewerking Hellingopwaarts ploegen Fruit aanplanten dwars op helling
Bodembedekking	Vervroegen oogst Nauwere rijafstand Groenbedekker Beperken zwartstrook Gewasresten op veld laten Stro opbrengen	Watergeleiding	Duidelijke perceelsgrens Groenstrook Beheer randen Opvang uitstroom Grasbaan Strobalen of hout
Grondbewerking	Niet-kerende bewerking Direct zaai Geen bewerking Drempeltjes Wielsporen lostrekken	Tijdelijke opvang	Dubbele inzaai in stroombaan Stro in stroombaan Snoeihout later ruimen Drainage stroombaan Buffers/Retentiebekkens Dammen in stroombaan
Bemesting	Losmaken na oogst Beheer pH Beheer humus		

Maring et al. (2008) geven de volgende lijst van maatregelen die gebruikt zouden kunnen worden voor de bestrijding van watererosie:

- Teeltechnische maatregelen met als doel verbetering bodemstabiliteit, bodembedekking en het bevorderen van infiltratie:
 - o Verandering grondgebruik (grasland i.p.v. akker)
 - o Gewaskeuze (snelle bodembedekking)
 - o Aanvullende bodembedekking
 - o Zorgen voor bodembedekking in winter (groenbemester)
 - o Zorgen voor bodembedekking tijdens teeltseizoen (bodembedekker, mulch, antistuifgewas, achterlaten van plantenresten)
 - o Stro op veld achterlaten
 - o grondbewerkingsmethode (ruwheid oppervlak, ruwheid zaaibed, organischestof bovenin houden, bodemleven sparen, minimale bewerking)
 - o Op peil houden/brengen van organische stof
 - o Grondbewerking ter verruwing van het oppervlak
 - o Lostrekken van verdichte grond (wielsporen, verslemping)
 - o Contourbewerking
- Inrichtingsmaatregelen/ infrastructurele maatregelen met als doel het breken van de kracht van het stromende water of het opvangen en geleiden van water:
 - o Duidelijke perceelsgrenzen/ bermen/groenstroken
 - o Verkleinen van percelen; verkorten hellinglengte
 - o Aanleg grasbaan ter geleiding van afstromen water
 - o Aanleg wateropvangbuffer met overloopvoorziening

3.2.2 Winderosie

Maatregelen ter preventie van winderosie zijn gericht om de grond bedekt te houden, de cohesie van de grond te verhogen of om de windsnelheid te verlagen. Maatregelen zoals windsingels zijn tevens bedoeld zijn om het eventueel geërodeerde zand in te vangen. Er bestaan verschillende maatregelen die gebruikt kunnen worden om winderosie tegen te gaan, zoals minimaal ploegen, gewasrotatie, heggen, windsingels en het bedekken van de kale bodem (Riksen et al, 2003). Het bedekt houden van de grond in de winterperiode is mogelijk door het toepassen van een wintergewas of groenbemester. Een praktisch probleem dat hierbij optreedt is dat de oogst van sommige gewassen dusdanig laat in het seizoen is, dat een goede opkomst van een nagewas niet meer mogelijk is. Hierdoor zullen deze percelen gedurende de winterperiode kaal blijven. Een ander systeem is het opbrengen van een beschermingslaag ter voorkoming van winderosie (b.v. papierpulp) of de cohesie van de grond te vergroten door het verhogen van het organisch stof-gehalte (Wagelmans, 2002). Voor de lange termijn is het verkleinen van de percelen, het aanbrengen van windsingels en het omzetten van akkerland in grasland een oplossing. Al deze maatregelen hebben een effect op de bedrijfsvoering en zijn niet altijd gewenst of mogelijk.

Riksen et al (2001) geven een overzicht van maatregelen tegen winderosie die binnen Europa gebruikt worden, van het effect van die maatregelen en van de mate van adoptie. Zij maken een onderscheid in vier typen maatregelen.

1. Beperken windsnelheid, bv. door strokenverbouw, windsingels en groenbemesters
2. Bodemstabilisatie en bodemruwheid, bv. door grondbewerking op een andere manier uit te voeren
3. Bodembescherming door bv. mulch of plastic
4. Risico mislukken oogst verkleinen door bv. gewaskeuze en landgebruiksverandering

Maring et al. (2008) geven de volgende lijst van maatregelen die gebruikt zouden kunnen worden voor de bestrijding van winderosie in Nederland (deels dezelfde maatregelen als voor watererosie):

- Teeltechnische maatregelen met als doel verbetering bodemstabiliteit en bodembedekking:
 - o Verandering grondgebruik (grasland i.p.v. akker)
 - o Gewaskeuze (snelle bodembedekking)
 - o Aanvullende bodembedekking
 - o Zorgen voor bodembedekking in winter (groenbemester)
 - o Zorgen voor bodembedekking tijdens teeltseizoen (bodembedekker, mulch, antistuifgewas, achterlaten van plantenresten)
 - o Stro op veld achterlaten
 - o Strodek/stro insteken
 - o Grondbewerkingsmethode (ruwheid oppervlak, ruwheid zaaibed, organische stof bovenin houden, bodemleven sparen, minimale bewerking)
 - o Op peil houden/brengen van organische stof
 - o Vasthouden toplaag voor winderosie (oppervlakkig aanbrengen van compost, rundveemest, cellulose, betacal, kunstmatige bodemstabilisatoren)
 - o Grondbewerking ter verruwing van het oppervlak
 - o Lostrekken van verdichte grond (wielsporen, verslemping)
- Inrichtingsmaatregelen/ infrastructuurle maatregelen met als doel het breken van de kracht van de wind of het stromende water of het opvangen en geleiden van water:
 - o Plaatsen windschermen (winderosie)
 - o Verkleinen van percelen

Wagelmans (2002) bespreekt in detail welke maatregelen geschikt zouden zijn om winderosie in Drenthe tegen te gaan. Een lijst met deze maatregelen werd voorgelegd aan akkerbouwers in Drenthe, die per maatregel hun commentaar gaven. Zij noemt de volgende maatregelen:

- Bedekkingsgewassen. Vanuit het oogpunt van winderosiebestrijding is dit een goede optie, zeker als het bedekkingsgewas op het land blijft staan en het hoofdgewas er tussen wordt gezaaid. Er zijn echter problemen geconstateerd, zoals een verslechtering van de bodemstructuur en het meer voorkomen van nematoden. Suikerbieten en aardappels zijn erg gevoelig voor nematoden. Een goede optie zou kunnen zijn om zomergerst (stuifgraan) tussen het gewas te zaaien, maar dit geeft geen permanente bedekking. Akkerbouwers zien dit als een goede maatregel, maar er zijn problemen met aardappelopslag (het opkomen van in de bodem achtergebleven aardappelen) en met wortelaaltjes.
- Achterlaten plantenresten. Deze methode is vooral geschikt voor granen en mais, maar minder voor suikerbieten en aardappels omdat voor die gewassen de hele plant geoogst wordt. Wel kan het loof van suikerbieten en aardappels achtergelaten worden op het veld. Akkerbouwers zien dit als een goede maatregel.
- Verankering van stro. Deze maatregel is relatief duur en vergt veel opslagruimte. In de praktijk wordt hij alleen toegepast in de bloembollenteelt. Akkerbouwers vinden deze maatregel te duur voor aardappels en suikerbieten, en overbodig voor granen en mais
- Barrières. Deze kunnen gemaakt worden op de velden (door planten tussen de gewasrijen) of tussen de velden (bv. windsingels, windschermen). De kosten voor windschermen zijn relatief hoog, maar zijn in principe eenmalig. Een probleem is dat deze maatregel niet altijd draagvlak heeft bij de bevolking. In de Veenkoloniën bijvoorbeeld is weerstand te verwachten omdat men van oudsher gewend is aan een open landschap, en omdat het aanbrengen van windschermen de kavels zou kunnen verkleinen. Akkerbouwers vinden de inspanning voor gewasrijen te groot en er is bij hen geen draagvlak voor windsingels en windschermen, behalve ter bescherming van woonkernen. Dit beeld wordt bevestigd door Eppink en Spaan (1989).
- Tegelijk zaaien van twee gewassen, waarvan het ene gewas langer op het land blijft dan het andere gewas. Voor rooigewassen is deze maatregel niet uitvoerbaar. Akkerbouwers vinden deze maatregel niet haalbaar.

- Verruwing van het bodemoppervlak, om zo de drempel voor winderosie te verhogen. Dit kan gedaan worden door zo groot mogelijke kluiten te creëren. Akkerbouwers vinden dit een goede techniek voor de meeste gewassen, maar niet voor aardappels omdat het daar opslagproblemen veroorzaakt.
- Vastleggen van de toplaag om gevoeligheid voor winderosie te verlagen. Dit kan bv. door het gebruik van rundveedrijfmest, cellulose, cellocol of GFT compost. Akkerbouwers zien voor- en nadelen voor de meeste producten. Prijs is vaak een probleem. Ook zijn niet alle producten toegestaan, of is een ontheffing nodig.
- Kunstmatige bodemstabilisatoren. Deze stabilisatoren zijn vrij duur, zijn lastig op te brengen, en hebben bij hoge dosering toxische effecten. Akkerbouwers waren hiermee niet bekend, maar vinden het te duur.
- Verandering landgebruik. Door het land als grasland te gebruiken zou het organisch stofgehalte verhoogd kunnen worden, zodat het op termijn geschikt zou worden voor het telen van andere gewassen dan suikerbiet en aardappel. Akkerbouwers staan hier positief tegenover.
- Verkleining velden. Het beperken van de veldlengte verlaagt de kracht van de wind, maar vergt meer inspanning wat betreft grondbewerking, zaaien en oogsten. Akkerbouwers zien dit niet als een haalbare maatregel.

De hierboven genoemde studies laten zien dat er veel maatregelen beschikbaar zijn, zowel tegen water- als tegen winderosie. Ook zijn de hier aangehaalde auteurs het op hoofdlijnen met elkaar eens wat betreft de effectiviteit van de genoemde maatregelen. Toch worden niet al deze maatregelen toegepast (zie paragraaf 3.3). Vaak zijn het de socio-economische factoren die de doorslag geven wat betreft het wel of niet implementeren van conserveringsmaatregelen (Rixsen et al, 2003; Morgan, 2005). In de Nederlandse situatie gaat het daarbij vooral om wetgeving, subsidiebeleid en economische motieven, hoewel daarnaast ook cultuur een rol kan spelen, zoals bv. in het geval van windsingels in de Veenkoloniën. Volgens Kwaad et al. (2006) zou een cost-benefit analyse de basis moeten zijn waarop de implementatie van maatregelen gebaseerd is, maar zo'n analyse is vaak moeilijk omdat er geen harde data zijn wat betreft de kosten die erosie met zich mee zou hebben gebracht op korte en op lange termijn (o.a. Kuhlman et al., 2010). Spaan et al. (2006) noemen gebrek aan geld en mankracht als belangrijke factoren die implementatie van maatregelen beperken.

3.3 Huidige maatregelen en verordeningen

Verschillende EU-lidstaten benaderen regelgeving voor erosiebestrijding op verschillende manieren. De houding in Nederland kan gekarakteriseerd worden met communicatie en verantwoordelijkheid, zoals blijkt uit Maring et al. (2008): 'Door goede communicatie met de betrokkenen is het mogelijk om de verantwoordelijkheden neer te leggen, dan wel te houden waar ze ook thuis behoren, namelijk bij de bodemgebruiker. Op basis van goede communicatie, gedeelde problematiek en gedeelde oplossingsgerichte visies is het mogelijk om bodemgebruikers maatregelen te laten nemen die je niet hoeft voor te schrijven. De regelgevende bevoegdheid is een belangrijke stok achter de deur, maar moet pas ingezet worden als blijkt dat de verantwoordelijkheden bewust niet worden genomen door de bodemgebruikers.' Met andere woorden: het nemen van adequate maatregelen tegen erosie wordt in eerste instantie overgelaten aan de landgebruikers, al betekent dit niet dat er helemaal geen regels voorgeschreven zijn. Wel wordt getracht om maatregelen te formuleren waarvoor voldoende draagvlak is bij alle betrokkenen. Kuhlman et al (2010) wijzen op het belang van beleid in situaties waar de maatschappelijke effecten (off-site effecten) groter zijn dan de on-site effecten van erosie; dit omdat onder die omstandigheden de maatregelen die boeren toe zouden passen tegen on-site effecten niet afdoende zijn tegen off-site effecten. In Nederland zijn voor zowel watererosie als winderosie de off-site effecten gewoonlijk groter dan de on-site effecten (Kuhlman et al, 2010; Spaan et al, 2010). Zulk beleid kan o.a. bestaan uit wettelijke maatregelen of subsidies, en appelleert, zoals hierboven vermeld, ook vaak aan de maatschappelijke verantwoordelijkheid van landbouwers.

3.3.1 Watererosie

Binnen de mestwetgeving (vanaf 1-1-2008 het Besluit Gebruik Meststoffen) geldt een aangepast beleid voor hellingen van meer dan 7%. Voor hellingen steiler dan 7% gelden restricties voor het opbrengen van mest op niet-beteelde grond, en voor hellingen steiler dan 18% is bemesting van bouwland verboden. Tabel 2 geeft een overzicht van de maatregelen die getroffen worden tegen watererosie in de verschillende delen van Nederland. In de volgende secties worden de gebieden afzonderlijk besproken.

Tabel 2

Maatregelen tegen watererosie in Nederland.

	Zuid-Limburg	Groesbeek	Overige gebieden
Technische maatregelen			
Bodembedekkers	Toegepast		Lokaal toegepast
Contour cultivation	Soms toegepast		
Strip cropping			
Mulch	Soms toegepast		
Groenstroken	Soms toegepast	Wordt gestimuleerd	
Bufferbasins/ retentiebekkens	Toegepast	Toegepast	
Graften (terrassen)	Aanwezig, maar sterk in aantal afgenomen sinds 1950	Niet aanwezig?	Lokaal toegepast
Aangepaste groundbewerking	Niet-kerende groundbewerking	Niet kerende groundbewerking	
Afvoerkanalen met gras (grassed waterways)	Soms toegepast		
Gecontroleerde afvoer via drainage buis	Soms toegepast		
Regelgeving			
Europees Landelijk	Cross-compliance CAP Kaderrichtlijn water, Waterwet, Mestwetgeving anders voor hellingen boven 7%	Cross-compliance CAP Kaderrichtlijn water, Waterwet, Mestwetgeving anders voor hellingen boven 7%	Cross-compliance CAP Kaderrichtlijn water, Waterwet, Mestwetgeving anders voor hellingen boven 7%
Provinciaal	Convenant aanpak erosie en wateroverlast 2000; bestaande graften beschermd		
Gemeente	Maatregelen op specifieke locaties (knelpunten)	Gemeente Groesbeek - maatregelen op specifieke locaties	
Productschap en LLTB	Verordeningen erosiebestrijding van HPA en PT	-	-
Overig	Waterschap Roer en Overmaas - maatregelen op specifieke locaties, beheer oppervlaktewater	Waterschap Rivierenland – maatregelen op specifieke locaties, beheer oppervlaktewater	

Zuid-Limburg

Van oudsher worden er in Zuid-Limburg al maatregelen tegen erosie genomen, zoals bv. graften. Onder andere door een schaalvergroting in de landbouw zijn deze maatregelen echter niet langer voldoende (Schouten et al, 1985) en is ook een groot deel van de bestaande graften verwijderd. Hoewel het totale areaal akkerland in Zuid-Limburg is afgenomen sinds 1910 is het areaal van de erosiegevoelige gewassen suikerbiet en mais toegenomen (Kwaad et al., 2006). Daarnaast is o.a. door compactie de bodemstructuur verslechterd en het waterbergend vermogen van de bodem afgenomen (Spaan et al., 2010). Klimaatsverandering zou ook kunnen leiden tot hogere piekafvoeren (Spaan et al., 2010). Bovendien is er steeds meer infrastructuur en bebouwing gekomen, waardoor meer schade optreedt (H. Winteraeken, pers.med.). Het initiatief om erosie te bestrijden kwam van de boeren zelf (Spaan et al., 2010), en vanaf 1987 (streekplan Zuid-Limburg) neemt

erosiebestrijding ook een belangrijke plaats in in het beleid van de provincie Limburg. Spaan et al. (2010) beschrijven de ontwikkeling van beleid ter bestrijding van erosie in Zuid-Limburg. Erosie wordt gezien als een proces dat bij de streek hoort en dus niet volledig voorkomen kan worden. Het doel van beleid is om wateroverlast en erosie te beperken tot maatschappelijk aanvaardbare proporties (H.Winteraeken, pers.med.). Als norm wordt gehanteerd dat er maximaal eens in de 25 jaar overlast mag zijn (P. Geelen, pers.med.).

Zoals beschreven door Maring et al. (2008) zijn er op dit moment in Limburg maatregelen tegen erosie voorgeschreven. De aanleiding hiervoor was de te vaak voorkomende water- en modderoverlast die hoge kosten veroorzaakte. Daar komt nu de normering in het kader van de KRW (Kaderrichtlijn Water) bij. Inzet voor nieuw beleid (vanaf 2008) is dat vanaf 2% helling ploegen zoveel mogelijk moet worden tegengegaan. Bij een helling >18% mag niet meer geploegd worden. Daarnaast worden stimuleringsmaatregelen ingezet o.a. voor de aanleg van groenstroken of permanent grasland of de toepassing van een aangepaste grondbewerking (zonder ploegen).

- Deze regels zijn opgenomen in een erosieverordening, vanuit de sector zelf: PA (Productschap Akkerbouw) en de PT (Productschap Tuinbouw), zoals beschreven in de volgende sectie. Op deze manier bestaat er voor de maatregelen meer draagvlak dan dat het door de provincie zou zijn voorgeschreven. De naleving van de regels en de controle daarop is wel een punt van aandacht. Deze vallen ook onder de verantwoordelijkheid van het PA.
- De PA - erosieverordening maakt onderdeel uit van de goede landbouwpraktijk / cross compliance.
- In Limburg is in 2000 met alle betrokkenen een 'Convenant versterkte aanpak erosie en wateroverlast 2000' afgesloten, waarin de onderlinge verantwoordelijkheden zijn opgesomd. In 2008 werd, als vervolg op dit convenant, de intentieverklaring erosiebestrijding door de landbouw van kracht.
- Er bestaat een provinciale richtlijn, waarin lijnelementen worden voorgeschreven bij landinrichtings- en herverkavelingsprojecten.
- Via de provinciale milieuverordening zijn bestaande graften beschermd en is het in het bodembeschermingsgebied Mergelland verboden om handelingen te verrichten waarvan men weet of redelijkerwijs kan vermoeden dat deze erosie van de bodem bevorderen.
- In het Besluit Gebruik meststoffen zijn maatregelen voorgeschreven voor steile hellingen.

Voor het zuidelijke heuvellandschap van Limburg is door het Hoofdproductschap Akkerbouw in 2003 een 'verordening erosiebestrijding landbouwgronden' gedefinieerd. In 2008 en 2009 zijn aparte verordeningen erosiebestrijding in Zuid-Limburg verschenen van het Productschap Akkerbouw en het Productschap Tuinbouw. Hierin zijn beheersmaatregelen opgenomen in afhankelijkheid van hellingpercentage en gebied, voor de periode tot 31 december 2012 en voor de periode daarna. Zo is er een aantal knelpunten aangewezen waar stringenter maatregelen ontworpen zijn omdat in deze gebieden het risico van overlast door watererosie groter is dan elders. Een overzicht van maatregelen vermeld voor akkerbouw is gegeven in tabellen 3 en 4. Deze maatregelen worden na een overgangperiode tot eind 2012 voor iedereen van kracht, en vervangen de individuele bedrijfserosieplannen. Er zijn verschillende redenen voor het vervangen van de bedrijfserosieplannen door meer eenduidige regels, zoals het feit dat de bedrijfserosieplannen te complex waren, dat de getroffen maatregelen niet allen effectief waren, en dat controle lastig was (Winteraeken en Spaan, 2010). Leidend principe in de nieuwe verordening is de toepassing van niet-kerende grondbewerking in combinatie met een bodembedekker. Traditioneel ploegen wordt alleen nog geaccepteerd als er additionele maatregelen worden getroffen die een vergelijkbaar effect hebben als niet-kerende grondbewerking in combinatie met een groenbedekker (Winteraeken en Spaan, 2010). Tot eind 2012 geldt er nog een stimuleringspremie voor niet-kerende grondbewerking van 50 euro per hectare (94 euro voor hellingen van meer dan 5%). Dit bedrag van 50 euro per hectare is gebaseerd op studies in België en Duitsland die aantoonde dat dit ongeveer de meerprijs per hectare is bij toepassing van niet-kerende grondbewerking (H.Winteraeken, pers.med.). Het gebruik van niet-kerende grondbewerking wordt ook gestimuleerd door het uitgeven van nieuwsbrieven door Waterschap Roer en Overmaas in samenwerking met de provincie Limburg. Deze nieuwsbrieven vermelden enkele problemen die op zouden kunnen treden bij niet-kerende grondbewerking; vooral: het (meer) voorkomen

van slakken, schimmels en onkruid, het gebruik van andere apparatuur en de afwezigheid van de mineraliserende werking van ploegen. Al deze nadelen zijn volgens de nieuwsbrieven goed te beheersen door middel van afstemming van grondbewerking, management en rassenkeuze.

De verordening voor de tuinbouw is nagenoeg gelijk aan die voor de akkerbouw, al wordt er voor fruitteelt nog onderscheid gemaakt tussen hellingen tussen 2 en 5 % en boven 5% (tot 18%). Het Productschap Akkerbouw coördineert de uitvoering van beide verordeningen en heeft samen met PT en LLTB een folder ontwikkeld die de verordeningen toelicht (Anonymous, 2010).

Tabel 3

Overzicht 'verordening erosiebestrijding landbouwgronden' voor het zuidelijke heuvellandschap van Limburg per hellingpercentage (per 1-1-2013).

Hellingpercentage	Maatregel
> 2%	Geen teelt van erosiebevorderend gewas, tenzij er niet-kerende grondbewerking en een groenbemester wordt toegepast of er voldoende capaciteit voor waterberging is. Alleen grasland toegestaan
> 18%	

Tabel 4

Overzicht 'verordening erosiebestrijding landbouwgronden' voor knelpuntgebieden in het zuidelijke heuvellandschap van Limburg (per 1-1-2013).

Situatie	Maatregel	Uitzondering
Overall	Grondbewerking najaar minimaal 15 cm diep	Niet bij grasondergroei en meerjarige gewassen. Niet bij hamsterovereenkomst
Teelt van bieten, mais en uien	Wissen van trekkersporen	Niet bij gebruik van directzaai. Niet bij hamsterovereenkomst

Ten aanzien van watererosie wordt de (op handen zijnde aanpassing van de) erosieverordening PA in samenhang met benedenstrooms door het waterschap te nemen maatregelen volgens de huidige inzichten ervaren als goede stappen om de watererosieproblematiek in Zuid-Limburg structureel aan te pakken, mits de voorgeschreven maatregelen inderdaad geïmplementeerd worden. Landbouwers zijn verplicht om erosie te melden als de uitspoelingsdiepte meer is dan 12 cm (Anonymous, 2010). De bestaande regelgeving maakt onderdeel uit van de goede landbouwpraktijk / cross compliance (Maring et al., 2008), die onderdeel is geworden van de Common Agricultural Policy (CAP) van de EU (Spaan et al., 2010). Boeren die niet aan de regels voldoen lopen daarmee het risico een deel van hun inkomenssteun van de EU kwijt te raken. Regels voor wijnbouw bestaan nog niet, maar zijn in voorbereiding (Anonymous, 2010).

Naast bovenstaande maatregelen, die genomen worden, dan wel voorgeschreven zijn, voor percelen worden er ook maatregelen genomen op specifieke locaties (knelpuntgerichte aanpak). Waterschap en gemeentes zijn verantwoordelijk voor (Kwaad et al., 2006): a) lijnvormige elementen in het landschap, zoals grasstroken en bermen, b) grassed waterways (met gras beplante afvoerkanalen), c) grasstroken langs wegen en retentiebekkens (figuur 8). Het waterschap Roer en Overmaas heeft ongeveer 350 retentiebekkens gebouwd (H. Winteraeken, pers.med.), al zijn er nog wel veel toevoervoorzieningen nodig. Het belangrijkste doel van deze bekkens is om schade aan bebouwing en infrastructuur te voorkomen (Winteraeken en Spaan, 2010). Daarnaast heeft het waterschap een adviserende rol wat betreft bestemmingsplannen en erosiebestrijding, en

voert het samen met de provincie nalevingscontroles uit. Gemeentes zijn specifiek verantwoordelijk voor bestemmingsplannen en voor maatregelen binnen de bebouwde kom.



Figuur 8

Maatregelen tegen erosie in Zuid-Limburg. Links: Grasstrook langs weg. Rechts: Retentiebekken (foto's M.Riksen).

Het beleid van de provincie Limburg is er daarnaast op gericht om nieuwe natuur te creëren op plekken waar er op het moment sprake is van erosie, o.a. via de EHS (ecologische hoofdstructuur). De provincie verstrekt ook subsidie voor het toepassen van niet-kerende grondbewerking.

Spaan et al. (2010) geven de volgende suggesties voor maatregelen, gebaseerd op twintig jaar ervaring in het werken met boeren en andere belanghebbenden in de regio:

1. Voorgeschreven maatregelen moeten eenduidig en eenvoudig zijn, er moet controle door deskundigen zijn en een minimum aan administratie om maatregelen te kunnen implementeren
2. De nadruk zou moeten liggen op niet-kerende grondbewerking, met retentiebekken om overtollig water op te vangen
3. Het stimuleren van Good Agricultural Practices (inclusief subsidieregelingen) is een goede optie omdat dit het erosieprobleem bij de bron aanpakt

Groesbeek

In het kader van het Strategisch Actiegebied Groesbeek (een gebiedsgericht programma waarin, de provincie Gelderland, gemeente Groesbeek, het Waterschap Rivierenland en DLG samenwerken) is een inventarisatie gedaan van mogelijke maatregelen en de effecten van die maatregelen op de bodem- en waterafvoer (Stolte et al., 2002). De randvoorwaarden van deze maatregelen zijn gedefinieerd door de werkgroep 'Erosie' van het Actiegebied. Het gebied viel ten tijde van het onderzoek binnen de Ruilverkaveling 'Groesbeek'. Dit heeft als gevolg dat voorgestelde maatregelen in het ruilverkavelingsplan meegenomen konden worden. De maatregelen zijn onder te verdelen in twee klassen: de gebruiksmaatregelen (behandeling van het veld) en de inrichtingsmaatregelen (elementen in het landschap introduceren zoals groenstroken en waterbuffers). Om de maatregelen te toetsen zijn er met het LISEM model (De Roo et al. 1996) computerberekeningen uitgevoerd.

Uit de berekeningen blijkt dat vooral het introduceren van een bodembedekker in de winter een duidelijke reductie in totale afvoer van zowel water als sediment geeft. Er is geadviseerd om in ieder geval deze maatregel in overleg met de boeren te introduceren, en de voorgestelde natuurontwikkeling in het ruilver-

kavelingsgebied zodanig uit te voeren dat er groenstroken aangelegd worden. Dit advies is besproken in de stuurgroep van het actiegebied die op basis hiervan een inrichtingsvoorstel heeft gedaan aan de land-inrichtingscommissie. Uiteindelijk heeft dit geleid tot een voorstel voor de aanleg van een aantal voorzieningen wat is opgenomen in het plan van toedeling. Het voorstel bevat:

- de aanleg van grasbermen langs een weg
- de aanleg van groenstroken tussen kavels
- de aanleg van een retentiebekken
- de aanleg van een sloot

Van der Kruis (2009) noemt de volgende maatregelen die genomen zijn in Groesbeek:

- In droogdalen zijn retentiebekkens aangelegd.
- Op een deel van de akkers wordt een niet-kerende grondbewerking toegepast. Het scheuren van grasland wordt alleen nog toegestaan als vervolgens een niet-kerende grondbewerking plaatsvindt.
- In het lage deel van Groesbeek zijn op enkele plaatsen de profielen van watergangen verbreed voor meer opvangcapaciteit.
- Er zijn diverse poelen gegraven in het lage deel van Groesbeek.
- De aanleg en het beheer van erosieremmende groenstroken word gestimuleerd.

Overige gebieden

Over het algemeen zijn de erosieproblemen in de overige gebieden gering, omdat het gaat om zandige bodems in combinatie met een vaak diepe grondwaterspiegel, zoals op de flanken van stuwwallen. Desondanks worden er incidenteel maatregelen toegepast, al zijn er geen voorschriften. Figuur 9 laat akkerbouw op de flanken van de Utrechtse Heuvelrug zien, met lokale toepassing van terrassen.



Figuur 9

Akkerland op de flanken van de Utrechtse Heuvelrug (links), met lokale toepassing van terrassen (rechts) (foto's R.Hessel).

3.3.2 Winderosie

Van overheidswege wordt er in Nederland weinig voorgeschreven voor winderosiebestrijding. In tegenstelling tot bv. in Duitsland zijn er in Nederland alleen regels voor sommige gebieden waar akkerbouw tot ernstige winderosie kan leiden (Riksen et al., 2003). Van Kerckhoeven et al (2009) vermelden dat in België de aandacht voor bestrijding van winderosie toeneemt als gevolg van de toenemende kennis over de schadelijke gevolgen

die vooral fijnstof kan hebben op de volksgezondheid. Boersema en Procé (1986) wezen erop dat winderosie een zichzelf versterkend proces is wat onomkeerbaar is; de agrarische kwaliteit van de bodem neemt af (zodat steeds meer bemesting nodig is om productie op peil te houden) en stuifgevoeligheid neemt toe. Aan deze lange termijn gevolgen van winderosie werd naar hun idee in 1986 al te weinig gedaan in het beleid.

In Nederland kunnen boeren in bepaalde gevallen een uitzonderingspositie krijgen bij maatregelen die elders in het land verplicht zijn. Zo zijn boeren over het algemeen verplicht om dierlijke mest onder te werken kort nadat het is opgebracht. Om de schade door winderosie te beperken hadden of hebben boeren in gebieden met een veenkoloniaal bouwplan, en op Texel, een uitzonderingspositie. In deze gebieden was het onder bepaalde voorwaarden toegestaan om in de lente dierlijke mest op te brengen als een beschermingslaag tegen winderosie (Maring et al., 2008). De reden voor deze uitzondering was dat het voor de boer te kostbaar is om andere maatregelen te nemen voor gewassen die weinig opbrengen, zoals aardappelen. Blijkbaar werd de bestrijding van winderosie van groter belang geacht dan de gevolgen die additionele belasting van het milieu met o.a. ammoniak kunnen hebben (Kuhlman et al, 2010). Doordat het in deze gebieden is toegestaan om dierlijke mest te gebruiken tijdens het groeiseizoen, zijn deze gebieden ook meer aantrekkelijk geworden voor het houden van vee. Het overschot aan dierlijke mest kon door de uitzondering eenvoudig weggewerkt worden, en het opbrengen van de mest beschermt de bodem tegen winderosie. Als een gevolg hiervan is landbouw in deze streken meer rendabel geworden. Deze uitzonderingspositie is echter in 2010 vervallen voor gebieden met een veenkoloniaal bouwplan, met de redenering dat er inmiddels verschillende alternatieve bestrijdingsmethoden beschikbaar zijn, zoals het afdekken met cellulose en het inzaaien van zomergerst (Bakker et al., 2010). Daarmee is de uitzondering nu alleen nog voor Texel van kracht (K.H. Wijnholds, pers.med., zie ook artikel 5 van Besluit Gebruik Meststoffen) omdat het voor Texel moeilijk is om alternatieven te vinden. Zo zou cellulose van elders aangevoerd moeten worden en is voor het bereiden van pulp water nodig, terwijl de hoeveelheid zoet water op Texel gering is (K.H. Wijnholds, pers.med.).

Daarnaast was de afgelopen jaren voor het toepassen van sommige middelen en producten ter bestrijding van winderosie een ontheffing nodig. Het betreft dan een ontheffing bestaat krachtens artikel 7 van het Meststoffenbesluit 1977 (IRS 2010). Voor sommige middelen, zoals cellulose, gold een ontheffing voor onbepaalde tijd. Het Meststoffenbesluit 1977 is per 1-1-2008 vervallen. Voor ontheffingen van verbodsbepalingen is er echter een periode van overgang tot 1-4-2011. Tijdens deze periode van overgang hebben de middelen die een ontheffing hadden volgens het Meststoffenbesluit 1977 de gelegenheid om zich te laten plaatsen (op basis van een in te dienen dossier) op een lijst van meststoffen die mogen worden verhandeld. Dit is lijst Aa, onder 1, van de Uitvoeringsregeling (een Regeling op basis van het Uitvoeringsbesluit) (P. Wilting, pers.med.). In het kader van de Meststoffenwet was het mogelijk om via een ontheffing een afvalstof te vermarkten als meststof. Dit was o.a. het geval voor cellulose. In de nieuwe systematiek van de Meststoffenwet kunnen ook afvalstoffen als meststof of als grondstof voor de productie van meststoffen worden gebruikt mits de stof is opgenomen in bovengenoemde bijlage Aa van de uitvoeringsregeling Meststoffenwet. In de nieuwe systematiek geldt bij afvalstoffen die in deze bijlage staan dat zij gebruikt mogen worden, maar voor deze stoffen is ook de Wet Milieubeheer van toepassing. Vanaf 1-4-2011 is de Meststoffenwet niet meer van toepassing op de verhandeling van winderosiebestrijdingsmiddelen als meststoffen (Ph. Ehlert, pers.med.). Deze gebruiksfunctie ressorteert niet meer onder de definitie van meststof van de Meststoffenwet. Voor middelen ter bestrijding van winderosie gelden dan geen bijzondere bepalingen anders dan die verbonden zijn aan bepalingen van REACH en daaraan gerelateerde bepalingen. Echter als een winderosiebestrijdingsmiddel een afval- of reststof is, dan geldt de Wet Milieubeheer. Het ministerie van I&M (voorheen VROM) is doende om afval- en reststoffen die aangewend worden als winderosiebestrijdingsmiddel een plaats in de regelgeving te geven. Totdat I&M deze stoffen geregeld heeft, blijven verleende ontheffingen geldig. In het kader van de Wet Milieubeheer is het nog wel mogelijk om ontheffingen aan te vragen. Die ontheffingen kan een boer aanvragen om een stof uit te rijden over zijn landbouwpercelen. Het bevoegde gezag is de provincie waaronder het landbouwperceel valt. Deze ontheffingen hebben een looptijd van een jaar omdat zij bedoeld zijn om een incidenteel probleem op te lossen (Ph. Ehlert, pers.med.).

Volgens het Besluit Gebruik Meststoffen (BGM) en het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet is het toepassen van compost toegestaan, mits men zich houdt aan de regels in het gebruiksnormenstelsel. Zo is het volgens artikel 3a van BGM niet toegestaan om compost te gebruiken als de bovenste bodemlaag verzadigd is met water, en mag het volgens artikel 3b tussen 1 september en 31 januari ook niet worden toegepast als de bodem wordt bevoeid, beregend of geïnfiltreerd.

Bepaalde beleidsmaatregelen voor landbouw en milieu kunnen een indirecte invloed hebben op winderosie. Zo kunnen boeren bv. onder EU verordening 2078/92 subsidie krijgen voor 'using farm practices compatible with the requirements of protection of the environment and natural resources, as well as the maintenance of the countryside and the landscape' (Rixsen et al., 2003).

Tabel 5 geeft een overzicht van maatregelen die in de verschillende delen van Nederland getroffen worden tegen winderosie. Deze gebieden worden in de volgende paragrafen apart besproken.

Tabel 5

Overzicht winderosie maatregelen in verschillende delen van Nederland (naar Eppink en Spaan, 1989).

	Veenkoloniën	Bollenvelden	Zandgronden Brabant en Limburg (asperges)	Overige gebieden
Technische maatregelen				
Windsingels	Weinig; geen draagvlak	Tot jaren 60; daarna verdwenen vanwege mechanisatie	Sinds 1950; redelijk effectief	
Bodembedekking (mulch)	Wordt gebruikt, maar snelle afbraak van resten aardappel en bietenplanten	Stro wordt veel gebruikt en is heel effectief, soms ook resten van planten	Niet gebruikt	
Groenbemester	Veel gebruikt, erg effectief. Gerst veel gebruikt	Erg effectief, maar alleen mogelijk voor narcissen	Niet gebruikt	
Rundveedrijfmest	Zeer effectief, per 2010 niet meer toegestaan	Zeer effectief maar niet meer toegestaan	Niet gebruikt	Alleen op Texel
Compost	Vroeger veel gebruikt, nu te duur	Niet gebruikt	Niet gebruikt	
Cellulose	Veel gebruikt, ontheffing nodig			
Bodemstabilisator	Veelal te duur, ontheffing nodig			
Bodemruwheid	Gebruikt	Niet gebruikt	Asperge richels zijn te hoog	
Plastic Ander landgebruik Stuifgewas	Niet geschikt ¹ Op beperkte schaal Toegepast	Niet geschikt ¹	Veel gebruikt	
Regelgeving				
Europees	Alleen indirect (bv. CAP, subsidies)	Alleen indirect (bv. CAP, subsidies)	Alleen indirect (bv. CAP, subsidies)	Alleen indirect (bv. CAP, subsidies)
Landelijk	Uitzondering mestwetgeving opgeheven per 2010	Uitzondering mestwetgeving opgeheven		Alleen op Texel uitzondering mestwetgeving
Gemeente Productschap	- Verordening winderosie ingesteld 1997, ingetrokken 2003			
Overig	-			

1. Volgens Eppink en Spaan (1989)

Veenkoloniën

In de Veenkoloniën werden in juli 2001 beleidsmaatregelen ingevoerd om winderosie te beperken. Boeren in de veenkoloniën werden verplicht om maatregelen te nemen op gedesinfecteerd land (Wagelmans, 2002). Dit omdat desinfectie van de bovengrond na het oogsten van aardappelen leidt tot een egale bovengrond die zeer erodeerbaar is. Boeren waren volgens de Verordening HPA bestrijding winderosie (1997) verplicht om ten minste één van de volgende maatregelen tegen winderosie te nemen: groenbemester, ruw bodemoppervlak creëren of het toepassen van een laag cellulose, compost of stro. Deze maatregelen dienden getroffen te zijn voor 16 december, wat te laat is om voor bv. groenbemester een goede bedekkingsgraad te verkrijgen voor de winter (Wagelmans, 2002). In 2003 is deze verordening weer ingetrokken, mede door een grotere nadruk op de eigen verantwoordelijkheid van de boeren, door deregulering en vanwege een gebrek van handhavingscapaciteit (Maring et al., 2008).

De akkerbouwers in Drenthe nemen de volgende maatregelen ter bestrijding van winderosie (Wagelmans, 2002; Eppink en Spaan, 1989):

- stuifgraan (zoals gerst)
- groenbemester
- achterlaten plantenresten
- beperkte grondbewerking
- afgenomen grondontsmetting
- rundveedrijfmest (niet meer toegestaan per 2010)
- ruw bodemoppervlak (behalve in aardappelteelt)

Voor meer informatie over deze maatregelen en andere potentiële maatregelen voor Drenthe zie hoofdstuk 2.2. De akkerbouwers gaven tevens aan dat ze mogelijk geïnteresseerd zouden zijn in:

- het in bepaalde gevallen omzetten van landbouwgrond in bosbouw
- de ontwikkeling van een machine voor tussenzaai
- betere cultivators voor snellere en betere grondbewerking
- aanvullend onderzoek naar de bestrijding van wortelaaltjes

Volgens K.H. Wijnholds (pers.med.) worden in de Veenkoloniën vooral gerst, cellulose en compost toegepast. Deze maatregelen zijn echter niet voldoende om in verstuivingsjaren winderosie voldoende tegen te gaan. Cellulose en bodemstabilisatoren mogen alleen worden toegepast als er voor het betreffende product een ontheffing bestaat krachtens artikel 7 van het Meststoffenbesluit 1977 (IRS 2010). Cellulose is prijzig, en is daardoor in de praktijk alleen inzetbaar voor de duurdere teelten (K.M. Wijnholds, pers.med.).

Uit verschillende onderzoeken (bv. Wagelmans, 2002; Eppink en Spaan, 1989) blijkt dat windsingels in de Veenkoloniën weinig tot geen draagvlak hebben, terwijl deze maatregel wel effectief is tegen winderosie. In Nedersachsen (Duitsland) bv. (Riksen en de Graaff, 2001) en op de zandgronden in Noord-Brabant en Limburg (Eppink en Spaan, 1982) is winderosie tot acceptabele proporties teruggebracht door de aanleg van windsingels. De nadruk die in de Veenkoloniën wordt gelegd op het belang van het handhaven van een open landschap is dan ook vanuit het oogpunt van winderosiebestijding ongunstig.

De toepassing van een wintergewas zoals winterrogge zou een optie kunnen zijn, maar is niet voor alle gewassen even geschikt. Door mestinjectie in het voorjaar raakt de rogge beschadigd, en wordt daardoor minder effectief tegen verstuiving. Bij aardappels valt deze schade wel mee, en de aardappels worden ook zo mogelijk gepoot in de mulch van de groenbemester. Bieten kunnen echter niet ingezaaid worden in de mulch die ontstaat na mestinjectie. Voor het inzaaien van bieten is het nodig om te spitten of te ploegen, omdat bieten een fijner zaai-bed nodig hebben. Na het ploegen is de rogge niet meer effectief en moeten er dus opnieuw maatregelen tegen winderosie genomen worden (K.H. Wijnholds, pers.med.). Dit probleem treedt ook op bij andere groenbemers dan winterrogge. Daarnaast verkleint de inzaai van winterrogge de kans op

bevriezen van de grond, en vergroot het daarmee de kans op problemen met aardappelopslag (K.H. Wijnholds, pers.med.). Voor groenbemesters, en ook voor andere maatregelen, geldt dat het toepassen van maatregelen niet altijd financieel rendabel is; voor gewassen zoals suikerbieten en fabrieksaardappelen is de kostenpost die hiermee gepaard gaat hoog in verhouding tot het risico dat verstuiving werkelijk optreedt (De Vries en Brouwer, 2006) en het toepassen van een groenbemester kan bv. ook de ontwikkeling van wortelaaltjes bevorderen (De Vries en Brouwer, 2006).

Zoals eerder vermeld werd het opbrengen van drijfmest tot 2010 toegepast, maar is het sinds het begin van 2010 niet meer toegestaan, terwijl het in het aangrenzende deel van Duitsland wel is toegestaan de mest op te brengen i.p.v. te injecteren. De reden om de uitzonderingspositie van de Veenkoloniën op te heffen was het terugbrengen van stikstofemissie conform Europese regels; echter deze regels worden door verschillende landen op verschillende wijze ingevuld, zoals de situatie in Duitsland laat zien.

Mede door de verstuiwingsproblematiek in 2010 is er bij boeren wel de bereidheid om mee te werken aan de ontwikkeling van beleid om winderosie te bestrijden. Zulk beleid zou niet alleen moeten bestaan uit maatregelen, maar zou ook mogelijkheden moeten bieden aan boeren. Binnen zulk beleid zou ook het als noodmaatregel opbrengen van drijfmest een plaatst kunnen krijgen. LTO Noord en het ministerie van LNV (nu EL&I) zijn hierover in overleg (LTO Noord, 2010).

Zandgronden Brabant en Limburg

Sinds ongeveer 1950 zijn er windsingels gebruikt bestaande uit berken en eiken. Hoewel deze windsingels niet zo effectief blijken als gehoopt, hebben ze wel zoveel effect dat winderosie in deze gebieden niet als een groot probleem wordt ervaren (Eppink en Spaan, 1989). Wel kan het blootwaaien van asperges een probleem zijn. Boeren passen op grote schaal plastic toe op de ruggen waarin de asperges verbouwd worden, voornamelijk om eerder te kunnen oogsten, maar het plastic biedt tevens bescherming tegen winderosie (Eppink en Spaan, 1989).

Bollenstreek

Eppink en Spaan (1989) beschrijven welke maatregelen er in het verleden zijn gebruikt in de Bollenstreek. Een overzicht is te vinden in tabel 5. Maatregelen zoals windsingels en ook het verbouwen in stroken (stripcropping) zijn verdwenen i.v.m. mechanisatie. Bodembedekking door mulch en groenbemester wordt wel gebruikt, en vooral stro is populair omdat het niet alleen beschermt tegen winderosie maar ook tegen vorst. Bodemstabilisatoren zoals rundveedrijfmest werden ook gebruikt, maar zijn niet meer toegestaan. In plaats daarvan worden nu stabilisatoren op basis van aardappelzetmeel of restproducten uit de papierindustrie (papierpulp) gebruikt. Door de getroffen maatregelen wordt winderosie in deze gebieden niet als een groot probleem ervaren.

Overige gebieden

Voor boeren op Texel worden uitzonderingen gemaakt wat betreft maatregelen die te maken hebben met het uitrijden van dierlijke mest (vooral rundveedrijfmest). Waar het in Nederland verplicht is om deze mest onder te werken, is dat op Texel onder bepaalde voorwaarden niet verplicht. Deze uitzonderingen zijn bedoeld om de kans op winderosie te verkleinen (Riksen et al., 2004).

4 Conclusies

Bodemosie is in Nederland regionaal een probleem en beperkt zich tot akkerland. Watererosie treedt vooral op in de lössgebieden van Zuid-Limburg en ook bij Groesbeek. Winderosie treedt vooral op in de Veenkoloniën in Drenthe en Groningen, en ook op de zandgronden van vooral Noord-Brabant en Drenthe, en in de Bollenstreek. Voor de eventuele Kaderrichtlijn Bodem zouden dan ook vooral de lössgebieden van Zuid-Limburg en de Veenkoloniën in aanmerking komen om aangewezen te worden als prioritare gebieden.

Erosiebestrijding krijgt veel aandacht in Limburg, waar maatregelen zijn geformuleerd op basis van samenwerking tussen provincie, waterschappen, gemeenten en ZLTO. Ook in het gebied rond Groesbeek worden maatregelen toegepast. De genomen maatregelen in deze gebieden lijken, mits volledig geïmplementeerd, voldoende, al kunnen ze erosie niet helemaal voorkomen.

Er worden ook maatregelen tegen winderosie getroffen, maar dit wordt meer aan de boeren zelf overgelaten dan het geval is voor watererosie. Omdat deze maatregelen veelal niet opgelegd worden en omdat de maatregelen zelf vaak economisch niet uit kunnen voor gewassen die relatief weinig opbrengen, is deze toepassing van maatregelen minder structureel dan voor watererosie. Vanuit het oogpunt van erosiebestrijding zou het ontwikkelen van beleid tegen winderosie een goede zaak zijn. Zulk beleid zou tot stand moeten komen door samenwerking tussen overheid (ministerie van EL&I) en LTO, om te zorgen dat het geformuleerde beleid niet alleen erosie effectief bestrijdt, maar ook voldoende mogelijkheden biedt aan de boeren.

Literatuur

Anonymous, 2010. Erosiebestrijding; de voorschriften vanaf 2009. Productschap Akkerbouw, Productschap Tuinbouw en LLTB, 10 pp.

Bakker, G., M.J.D. Hack-ten Broeke, F. de Vries en J.J.H. Van den Akker, 2010. Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden - Quick Scan voor Drenthe. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 1964.

Boersema, J. en C. Procé, 1986. Wind-erosie, een onderschat probleem. Noorderbreedte, themanummer 'Grond', pp. 252/253.

Bradford, J.M. en C. Huang, 1996. Splash and detachment by waterdrops. Ch 4 in: Agassi, M. (Ed.) Soil erosion, conservation and rehabilitation. New York: Marcel Dekker, pp. 61-76.

Brazier, R.E., K.J. Beven, J. Freer en J.S. Rowan, 2000. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: Application of the GLUE methodology to WEPP – The water erosion prediction project – for sites in the UK and USA. Earth Surface Processes and Landforms 25, pp. 825-845.

Chardon, W.J. en K.W. van der Hoek, 2002. Berekeningsmethode voor de emissie van fijnstof vanuit de landbouw. Wageningen: Alterra-rapport 682.

Dijk, P.M. van en F.J.P.M. Kwaad, 1996. Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils. Hydr. Processes 10: pp. 1049-1059.

Eck, W. van, D. Slothouwer, J.B. Sprik en G.F.P. IJkelstam, 1995. Erosienormeringsonderzoek Zuid-Limburg: Kosten en baten van erosiebestrijdingsmaatregelen in Zuid-Limburg. DLO-Staring Centrum. Rapport 364.2.

Eppink, L.A.A.J., 1982. A survey of wind and water erosion in the Netherlands and an inventory of Dutch erosion research. Report Dept. of Land and Water Use 59. Agricultural University Wageningen, the Netherlands.

Eppink L.A.A.J. en W.P. Spaan, 1989. Agricultural wind erosion control measures in the Netherlands. Soil Technology Series 1: pp. 1-13

Essen, P. van, A. Toepoel, S. Defrijn, J. Stolte, E. Mathijs, J. de Graaff en S. Verzandvoort-Van Dijck, 2006. Aceptatie van erosiebestrijdingsmaatregelen. Iterreg Project Erosiebestrijding. Alterra, Wageningen, 48 pp.

Evrard, O., C.L. Bielders, K. Vandaele en B. van Wesemael, 2007. Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. Catena 70, pp. 443-454.

Fox, F.A., D.C. Flanagan, L.E. Wagner en L. Deer-Ascough, 2001. WEPS and WEPP science commonality project. Proceedings of the International Symposium 'Soil erosion research in the 21st century', Honolulu, 3-5 January, 2001, pp. 376-379.

Fryrear, D.W. en J.D. Bilbro, 1998. Mechanics, Modeling, and controlling soil erosion by wind. In: Pierce, F.J. en W.W. Frye, W.W. (Eds.) Advances in Soil and Water conservation. Chelsea: Ann Arbor, pp. 39-49.

- Funk, R., E.L. Skidmore en L.J. Hagen, 2002. Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS. Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, Lubbock, Texas, pp. 235-238.
- Geelen, P.M.T.M, 2006. Handboek Erosiebestrijding. Interregproject Erosiebestrijding. Provincie Limburg (B), Hasselt, 100 pp.
- Goossens, D., 2004. Wind erosion and tillage as a dust production mechanism on North Europe farmland. In: Goossens en Riksen (Eds.). Wind erosion and dust dynamics: observation, simulations, modelling. ESW Publictaions, Wageningen, the Netherlands.
- Gregory, J.M. en M.M. Darwish, 2001. Test results of TEAM (Texas Tech Erosion Analysis Model). Proceedings of the International Symposium 'Soil erosion research in the 21st century', Honolulu, 3-5 January, 2001, pp. 483-485.
- Gregory, J.M. en M.M. Darwish, 2002. Prediction success with integrated, process-based wind-erosion model. Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, Lubbock, Texas, pp. 246-250.
- Hack-ten Broeke, M.J.D., C.L. van Beek, T.Hoogland, M.Knotters, J.P. Mol-Dijkstra, R.L.M. Schils, A.Smit en F. de Vries, 2009. Kaderrichtlijn Bodem; Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2007.
- Hagen, L.J., 2001. Validation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion submodel on small cropland fields. Proceedings of the International Symposium 'Soil erosion research in the 21st century', Honolulu, 3-5 January, 2001, pp. 479-482.
- IRS, 2010. Preventie van schade door winderosie. IRS teelsmap 5.4 <http://www.irs.nl/> (18 november 2010)
- Jetten, V., G. Govers en R. Hessel (2003), Erosion models: quality of spatial predictions. Hydrological Processes 17, pp. 887-900.
- Jönsson, C., 1985. Vindskadornas omfattning och inverkan på betodlingen. Betodlaren 48(1): pp. 60-62.
- Kirkby, M., 1998. Modelling across scales: the MEDALUS family of models. In: Boardman, J. & D. Favis-Mortlock (Eds.) Modelling soil erosion by water. NATO ASI Series I 55. Berlin: Springer, pp. 161-173.
- Kerckhoven, S. van, M. Riksen en W. Cornelis, 2009. Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen. Faculteit Bio-Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, 79 pp.
- Kruis, A. van der, 2009. Groenblauwe dooradering en recreatieve toegankelijkheid in het LOP-gebied van Groesbeek, Millingen aan de Rijn en Ubbergen. Nulsituatie LOP januari 2009 Hoofdrapport. Stichting Via Natura, maart 2009, 38 pp.
- Kuhlman, T., R. Michels en B. Groot, 2010. Kosten en baten van bodembeheer, Maatregelen tegen winderosie, veenafbraak en ondergrondverdichting. LEI-rapport 2010-58, 64 pp.
- Kwaad, F.J.P.M. en E.J. van Mulligen, 1991. Cropping system effects of maize on infiltration, runoff and erosion on loess soils in South-Limbourg (The Netherlands): A comparison of two rainfall events. Soil Technology 4, pp. 281-295.

- Kwaad, F.J.P.M., M. van der Zijp en P.M. van Dijk, 1998. Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil & Tillage Research* 46, pp. 13-21.
- Kwaad, F.J.P.M., A.P.J. de Roo en V.G. Jetten, 2006. The Netherlands. Ch 1.31 in: Boardman, J., J.Poesen (Eds) *Soil Erosion in Europe*. John Wiley & Sons, Chichester, England, pp. 413-426.
- Lal, R., 1990. *Soil erosion in the tropics; principles and management*. New York: McGraw-Hill, 580 pp.
- LTO Noord, 2010. Inventarisatie stuifschade Veenkoloniën.
http://www.ltonoord.nl/templates/dispatcher.asp?gensubsub=true&page_id=25223092 (18 november 2010).
- Maring, L., P. van Gaans en A. Niessen (eds), 2008. Prioritaire gebieden bodembeheer in Nederland – waar hebben we het over in de Europese Richtlijn Bodem. Initiatiefgroep prioritaire gebieden Europese Richtlijn Bodem, Utrecht, 63 pp.
- Morgan, R.P.M., 2005. *Soil erosion and conservation*. 3rd edition. Blackwell Publishing Ltd, 304 pp.
- Morgan, R.P.M. en J.N. Quinton, 2001. Erosion modelling. Ch 6 in: Harmon, R.S. & W.W. Doe (Eds.) *Landscape erosion and evolution modeling*. New York: Kluwer Academic/Plenum, pp. 117-143
- Nelen en Schuurmans, 2008. *Waterplan Groesbeek*, 51pp.
- Nordström, K., 1988. Gully erosion in the Lesotho lowlands. A geomorphological study of interactions between intrinsic and extrinsic variables. UNGI rapport 69.
- Pelt, R.S. van en T.M. Zobeck, 2002. Validation of the wind erosion equation (WEQ) for discrete periods. *Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference*, Lubbock, Texas, pp. 287-291.
- Poesen, J., 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Ed.) *Farm land erosion: In temperate plains environments and hills*. Elsevier Science Publishers, pp. 221-239.
- Prendergast, A.G. (ed.), 1983. *Soil Erosion*. Abridged proceedings of the workshop on 'Soil erosion and conservation: assessment of the problems and the state of art in EEC countries' held in Florence, Italy, 19-21 October 1982. Directorate-General Agriculture: Luxembourg.
- Riksen, M., 2004. Off-site effects of wind erosion on agricultural land in Northwestern Europe. In: Goossens & Riksen (Eds.). *Wind erosion and dust dynamics: observation, simulations, modelling*. ESW Publictaions, Wageningen, the Netherlands.
- Riksen, M.J.P.M. en J. de Graaff, 2001. On-site and off-site effects of wind erosion on European light soils. *Land Degrad. Develop.* 12: pp. 1-11.
- Riksen, M.J.P.M. en D. Goossens, 2007. The role of wind and splash erosion in inland drift-sand areas in the Netherlands. *Geomorphology* 88, pp. 179-192.
- Riksen, M., F.Brouwer, W.Spaan, J.L. Arrue en M.V. Lopez, 2003. What to do about wind erosion. Ch4 in: Warren, A. (Ed.) *Wind erosion on agricultural land in Europe, EC*, Directorate-General for Research, Luxemburg, pp. 39-52.

- Riksen, M., F.Brouwer en J. de Graaff, 2003. Soil conservation policy measures to control wind erosion in Northwestern Europe. *Catena* 52, pp. 309-326.
- Roo, A.P.J. de, 1991. The use of ¹³⁷Cs as a tracer in an erosion study in South Limburg (the Netherlands) and the influence of Chernobyl fallout. *Hydr. Processes* 5: pp. 215-227
- Roo, A.P.J. de, P.M. van Dijk, C.J. Ritsema, N.H.D.T. Cremers, J. Stolte, K. Oostindie, R.J.E. Offermans, F.J.P.M. Kwaad en M.A. Verzandvoort 1995. Erosienormeringsonderzoek Zuid-Limburg, veld- en simulatiestudie. DLO-Staring Centrum rapport 364.1. Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht / Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam / DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Roo, A.P.J. de, R.J.E. Offermans en N.H.D.T. Cremers, 1996. LISEM: A single-event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: Sensitivity analysis, validation and application. *Hydr. Processes* 10: pp. 1119-1126
- Schouten, C.J., M.C. Rang en P.M.J. Huigen, 1985. Erosie en wateroverlast in Zuid-Limburg. *Landschap* 2: pp. 118-132.
- Sharma, P.P., 1996. Interrill Erosion. Ch 7 in: Agassi, M. (Ed.) *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York: Marcel Dekker, pp. 125-152.
- Spaan, W.P. en G.D. van den Abeele, 1991. Wind borne particle measurements with acoustic sensors. *Soil Technology* 4: pp. 51-63.
- Spaan, W.P., H.J. Winterraeken en M.J.P.M. Riksen, 2006. Dutch policy and practices on erosion control: Then and now. *Archives of Agronomy and Soil Science* 52, pp. 233-241.
- Spaan, W., H. Winterraeken en P. Geelen, 2010. Adoption of SWC measures in South Limburg (The Netherlands): Experiences of a water manager. *Land Use Policy* 27, pp. 78-85.
- Sterk, G., M. Riksen en D. Goossens, 2001. Dryland Degradation by wind erosion and its control. *Annals of Arid Zone* 41 (2001) 3 - p. 351 - 367.
- Stolte, J., C.J. Ritsema en T. Li, 1999. Invloed van verschillende landinrichtingsscenario's op de bodem- en waterafvoer in het zuidelijk deel van de ruilverkaveling Groesbeek. DLO-Staring Centrum. Rapport 644
- Stolte, J., C. Ritsema en H. Wösten, 2000. Oppervlakte-afvoer: een combinatie van helling, bodem, gewas en regen. *Stromingen* 6 (2000), nummer 4: pp. 27-36.
- Stolte, J., F.J. Kalis en C.J. Ritsema. 2002. Erosiebestrijding in vlak Nederland. *Bodem* 4: pp. 133-135.
- Stolte, J., R. Hessel en C.J. Ritsema, 2005. Bodemerrosie. Leidraad Bodemsanering 5200, afl 64, juni 2005. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne, Directie Bodem, Water, Stoffen.
- Tatarko, J. en L. Wagner, 2002. Using WEPS with measured data. Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, Lubbock, Texas, pp. 282-284.

Ten Cate, J.A.M., A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek. Richtlijnen en voorschriften. Deel D: Interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Technisch document 19D.

Toy, J.T., G.R. Foster en K.G. Renard, 2002. Soil erosion: Processes, prediction, measurement, and control. New York: Wiley, 338 pp.

Troeh, F.R., J.A. Hobbs en R.L. Donahue, 1990. Soil and water conservation. Second edition. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 530 pp.

Verstraeten, G., J. Poesen, D. Goossens, K. Gillijns, C. Bielders, D. Gabriels, G. Ruyschaert, M. van den Eeckhout, T. Vanwallegem en G. Govers, 2006. Belgium. Ch 1.30 in: Boardman, J., J.Poesen (Eds) Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons, Chichester, England, pp. 385-411.

Vries, F. de en F. Brouwer, 2006. De bodem van Drenthe in beeld. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1381.

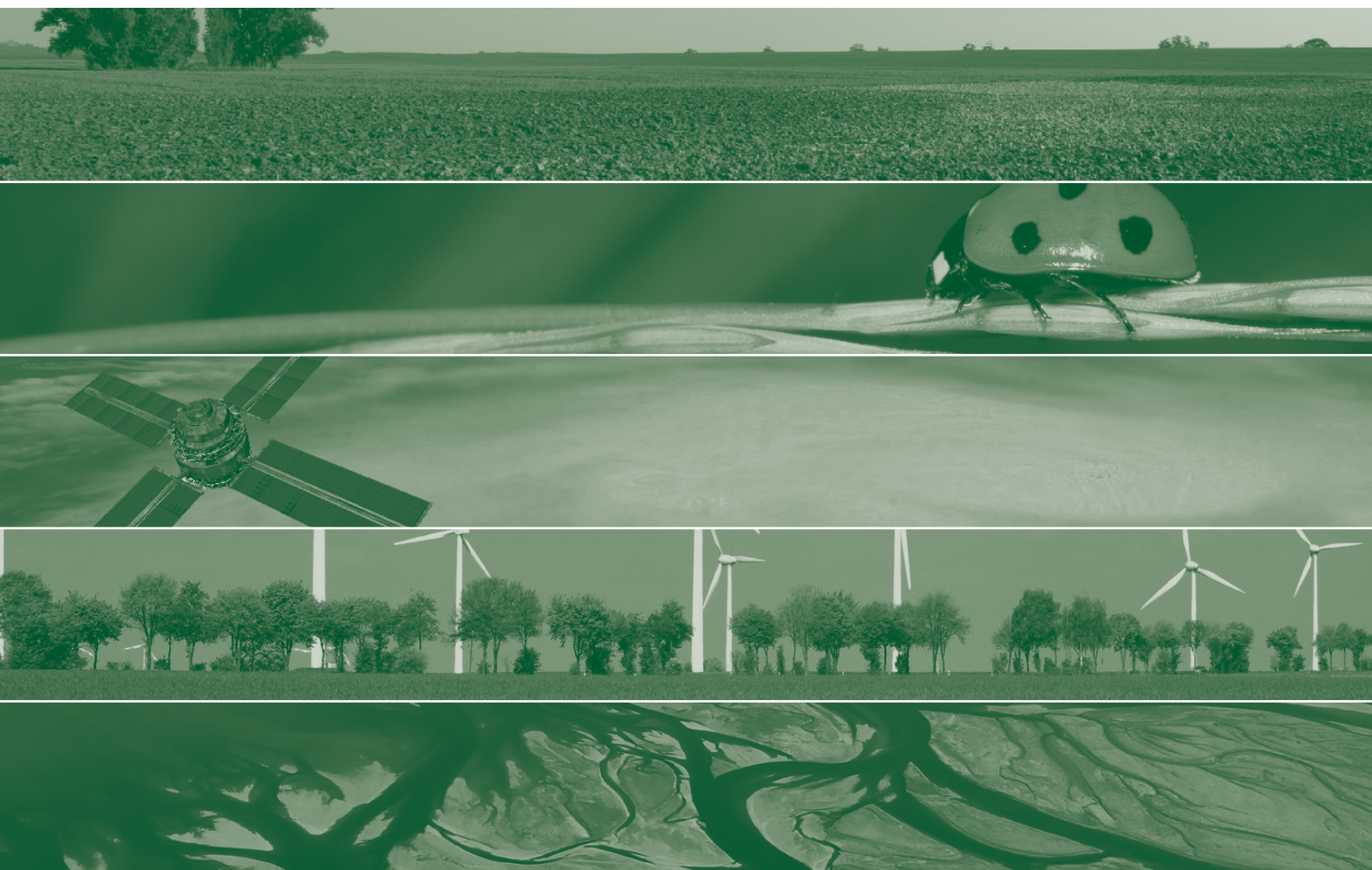
Wagelmans, M., 2002. Ontwikkeling van beleid ter bestrijding van winderosie. Bioclear BV, 32 pp.

Wagner, L.E. en J. Tatarko, 2001. WEPS 1.0 – What it is and what it isn't. Proceedings of the International Symposium 'Soil erosion research in the 21st century', Honolulu, 3-5 January, 2001, pp. 372-375.

Winteraeken, H.J. en W.P. Spaan, 2010. A new approach to soil erosion and runoff in South Limburg - the Netherlands. Land Degradation and Development 21, pp. 1-7.

Woodruff, N.P. en F.H. Siddoway, 1965. A wind erosion equation. Soil science society of America Proceedings 29, pp. 602-608.

Zobeck, T.M., S. van Pelt, J.E. Stout en T.W. Popham, 2001. Validation of the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events and discrete periods. Proceedings of the International Symposium 'Soil erosion research in the 21st century', Honolulu, 3-5 January, 2001, pp. 471-474.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl