

NOTA 1169

januari 1980

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

WINDEROSIE EN DE VEENKOLONIËN

ir. P.C.M. Brussel

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

I N H O U D

	blz.
INLEIDING	1
DEEL I: WINDEROSIE IN DE VEENKOLONIËN	4
1. ALGEMEEN	4
2. PROCES EN GEVOLGEN	6
3. BESTRIJDINGSMIDDELEN EN METHODEN	8
4. SLOTSOM	16
DEEL II: ASPECTEN VAN WINDEROSIE	19
1. ALGEMEEN	19
2. HET PROCES	21
2.1. Meteorologische factoren	21
2.1.1. De wind	21
2.1.2. Overige meteorologische factoren	35
2.2. Bodemkundige factoren	37
2.2.1. Textuur	38
2.2.2. Bindende eigenschappen	39
2.2.3. Overige bodemkundige factoren	44
3. BEPALING VAN EROSIEGEVOELIGHEID EN EROSIE	46
3.1. Erosiegevoeligheid	47
3.2. Omvang van winderosie	53
3.3. Meten; methoden en instrumenten	56
3.3.1. Meteorologische factoren	56
3.3.2. Bodemkundige factoren	58
3.3.3. Omvang	61
3.3.4. Windtunnels	62

	blz.
4. DE GEVOLGEN VAN WINDEROSIE	62
5. BESTRIJDING VAN WINDEROSIE	66
5.1. Remmen van de windsnelheid	67
5.1.1. Grondbewerking/stoppelbewerking	68
5.1.2. Gewasbedekking	72
5.1.3. Windschermen	75
5.2. Vermindering van de erosiegevoeligheid	84
5.2.1. Vergroten van de samenhang tussen de bodemdeeltjes	84
5.2.2. Afdekken van de bodem	87
6. NAWOORD	87
LITERATUUR	88
BIJLAGE I : BEGRIPPEN	100
BIJLAGE II : SYMBOLEN	101
BIJLAGE IIb : OPMERKINGEN BIJ BIJLAGE II	102
BIJLAGE III : FREQUENTIEBEREKENING STUIFGEVOELIGHEID	103

.... waait de wind, de stomme wind
en schuurt het zand over m'n land
m'n vlakke land ...

(Jacques Brel)

INLEIDING

Een van de meest onderschatte gevaren die ons milieu bedreigen is de winderosie en de daarmee gepaard gaande bodemverarming en lucht- en waterverontreiniging. Telkens na grote catastrofes is de aandacht voor dit probleem groot en worden uitgebreide en ingrijpende maatregelen genomen. Enkele jaren later echter is men alles weer vergeten en worden de bodembeschermende maatregelen gedeels verlaten.

Na de grote stofstormen in de Great Plains in de dertiger jaren werd de Amerikaanse bodembeschermingsdienst opgericht. In enkele jaren tijd werd omvangrijk onderzoek verricht, hetgeen onder andere leidde tot uitgebreide windsingelaanleg en bodembeschermingsmaatregelen als 'mulching' en verschillende vormen van minimale grondbewerking. Gronden werden uit cultuur genomen en deels in gras gelegd, waarbij slechts extensieve beweiding werd toegestaan. Gaandeweg werden deze maatregelen evenwel ongedaan gemaakt en werd ongeschikt terrein weer in cultuur genomen. Grote droogte in de vijftiger jaren leidde tot nieuwe stofstormen, tot hernieuwing en uitbreiding van het onderzoek en beschermende en bestrijdende maatregelen. En weer verflauwde na enige jaren de aandacht. De voorlopig laatste fase vond plaats in het midden van de jaren zeventig. De schattingen van de verstuivingsschade nu overtreffen die van de dertiger jaren. (ECKHOLM, 1976; DE VREEDE, 1977; GRANT, 1975; KIMBERLIN e.a., 1977).

De ervaring leert kennelijk niet voldoende en ook van elkaar leren we slecht. In de tweede helft van de jaren vijftig werden in Aziatisch Rusland uitgebreide steppen in cultuur genomen, binnen enkele jaren resulterend in catastrofale winderosie.

Zo zijn er nog vele voorbeelden te geven (ECKHOLM, 1976; KOVDA, 1977), meest in aride en semi-aride gebieden. Ook in humide streken echter doet het probleem zich voor. En ook hier schijnen we niet te leren van eigen en andermans ervaring. Kennis van het proces en van bestrijdingsmethoden zijn voorhanden, maar het ontbreekt steeds aan onderkenning van het gevaar, alsook aan een systeem van (bedrijfs-) economische en sociaal culturele voorwaarden om deze kennis te effectueren.

In Nederland zijn het vooral de lichtere gronden die gevoelig zijn voor winderosie, zoals in de duingebieden, de Peel en de Veenkoloniën (Miedema, 1950). Vastlegging van duinzand geschiedt via een continue vegetatieve bedekking, de aspergevelden rond Grubben-vorst zijn in zekere mate beschermd via windsingels (CABL, 1960).

De herinrichting van het veenkoloniale gebied, welke reeds een tiental jaren in studie is biedt de mogelijkheid om het stuifprobleem in deze streek integraal aan te pakken. In de ontwikkelingen tot nu toe blijkt echter ook hier de onderschatting. Stuiven en stofstormen en de gevolgen daarvan voor de landbouw en de omwonenden worden noch in de Streekplannen (STREEKPLAN OOST EN ZUID-OOST DRENTE, 1979 en VOORONTWERP STREEKPLAN GRONINGEN, 1979), noch in de herinrichtingswet genoemd. Het uitgangspunt, dat het gebied als open landschap met grootschalige akkerbouw behouden moet blijven, en waarin de aardappel gezien de afzetmogelijkheden een belangrijk gewas blijft, maakt het treffen van maatregelen bij voorbaat een moeilijke zaak. Een volkomen bescherming van de Veenkoloniën tegen winderosie door een groot deel in gras te leggen of door een sluitend systeem van windsingels zal momenteel technisch, economisch en cultureel niet aanvaardbaar zijn. Het doel van deze nota is bestuur en bevolking te wijzen op het gevaar van onderschatting van de winderosie, en wegen tot bestrijding aan te dragen, zodat bij het maken van plannen de bodembescherming medebepalend zal zijn.

Deze nota is daartoe in tweeën gedeeld:

Deel I geeft een kort overzicht van de situatie in de Veenkoloniën met betrekking tot de winderosie en de gevolgen daarvan, mogelijke bodembeschermende maatregelen en hun effecten en neveneffecten.

Deel II is een literatuuroverzicht betrekking hebbend op vrijwel alle aspecten van winderosie. Hierin wordt basisinformatie gegeven voor verdere uitdieping van het probleem of onderdelen daarvan.

DEEL I. WINDEROSIE IN DE VEENKOLONIËN

1. ALGEMEEN

Ieder jaar komen er verstuivingen voor in het Veenkoloniale gebied, voornamelijk in het voorjaar. Eens in de drie à vier jaar is er sprake van een echt stuifjaar (KNOTTNERUS, 1980). Het laatste voorjaar (1979) was echter zeer nat. In zo'n situatie is de boer meer geïnteresseerd in verbeterde ontwatering, droger maken van de bouwvoor. Blijvende maatregelen in zulke gevallen kunnen in drogere jaren leiden tot gevaarlijke uitdroging van de bodem. Bij harde wind over een nagenoeg kale bodem zal het dan snel gaan stuiven. In bijlage III wordt een frekwentieverdeling gegeven van winderosiegevoelige omstandigheden.

Welke gronden zijn nu stuifgevoelig? Stuifgevoeligheid wordt vooral bepaald door structuur en textuur van de bodem, waarbij deeltjesgrootte, vocht-, lutum- en organische stofgehalte een hoofdrol spelen. Daarnaast speelt gewasbedekking een overwegende rol. Een volgroeid gewas beschermt de bodem volledig. Voor de periode waar het hier betreft (januari tot en met mei) wordt echter uitgegaan van een nagenoeg braakliggende bodem.

Deeltjes met een diameter groter dan $\pm 0,8$ mm (grof zand)* en aggregaatjes groter dan $\pm 1,2$ mm (KNOTTNERUS, e.a., 1972) stuiven niet. Bestaat de oppervlakte voor meer dan de helft uit dergelijke deeltjes, dan is die grond praktisch ongevoelig voor winderosie. Klei- en leemgronden zijn vrijwel ongevoelig voor winderosie, enerzijds omdat deze voor een groot deel bestaan uit aggregaten van voldoende omvang, anderzijds omdat de wind geen vat heeft op in rust verkerende deeltjes kleiner dan $\pm 0,05$ mm, voornamelijk als gevolg van sterke cohesieve bindingen.

*korrelgrootteklasse-indeling volgens STIBOKA

De gronden in het Veenkoloniale gebied kunnen voor een groot deel worden beschouwd als zandgronden (KAARTEENHEDEN 94 t/m 99, jonge en oude hoogveenontginningsgronden, BODEMKAART VAN NEDERLAND, 1965). Met een zandige, lutumarme bouwvoor met een relatief hoge (5 - 25%) maar slechts gedeeltelijk effectieve hoeveelheid organische stof, boven op een ondergrond van eolisch dekzand, zijn deze gronden voor een aanzienlijk deel vatbaar voor winderosie (75 000 ha, PEERLKAMP, 1970).

De oude hoogveenontginningsgronden zijn de armste met een organisch stofgehalte van 5 - 15%, direkt op het zand. De jongere ontginningsgronden zijn in toenemende mate op een betere wijze omgezet (o.a. krachtens de wet van 1900). De bouwvoor heeft een hoger gehalte aan organische stof, terwijl bovendien in veel gevallen nog een hoeveelheid veen onder de bouwvoor aanwezig is, welke de boer jaarlijks kan aanploegen. Overigens wordt daarmee wel het proces van organische stofafbraak versneld. Bovendien is dit een eindig proces, waarna ook deze bodems zullen bestaan uit een humusarme bouwvoor op een zand-ondergrond. Vormen van diepe grondbewerking als diep- en mengwoelen, welke reeds twintig jaar in onderzoek zijn, breken de vaste lagen, creëren een diepere bouwvoor, verbeteren de doorwortelbaarheid en de vochthuishouding, maar versnellen uiteindelijk eveneens de afbraak van organische stof, tot een evenwichtsgehalte (van $\pm$ 2%) bij het huidige gebruik (WIND, 1979).

Een steeds groter deel van de Veenkoloniale bodem zal daardoor in toenemende mate stuifgevoelig worden. Als de organische koek op is zal een klimatologisch ongunstig voorjaar ernstige gevolgen hebben. Ook nú echter is de omvang van de schade in een ongunstig jaar tientallen miljoenen guldens (LUMKES en TE VELDE, 1973).

Winderosie in de Veenkoloniën is een onomkeerbaar voortschrijdend proces. Verhoging van het humusgehalte is vrijwel onmogelijk (IB, 1979). Het huidige gebruik leidt uiteindelijk tot boeren op het zand en jaarlijks toenemende schadeposten ten gevolge van winderosie.

De herinrichting biedt de mogelijkheid de noodzakelijke voorwaarden te scheppen om dit proces te stoppen. Landbouw, natuur en landschap zijn daarmee gediend.

2. PROCES EN GEVOLGEN

Bij een organisch stofgehalte lager dan 7% (colloïdaal), hetgeen voor de dalgronden neerkomt op 15% (10-20%) zal een braakliggende, vlakke en droge (ook vorstdroog!) grond bij een lage luchtvochtigheid (r.v. < 60%) bij een windsnelheid van meer dan zeven m/s, gemeten op 10 meter hoogte (4 Beaufort) gaan stuiven. Deze situatie doet zich voornamelijk in het voorjaar voor bij Oostenwind (schrane wind). Harde Zuid-Wester komt echter ook regelmatig voor.

Deeltjes in de grootteklasse van 0,08 - 0,8 mm (fijn en matig grof zand zoals in de dalgronden) en aggregaatjes met een grootte van 0,1 - 1,2 mm worden door de wind opgenomen en over enige afstand verplaatst en komen onder invloed van wind en zwaartekracht, met een verhoogde kracht en snelheid weer neer. Daardoor worden andere deeltjes losgemaakt en aggregaten afgebroken tot erosiegevoelige afmetingen. Grotere deeltjes tot 2,0 mm en aggregaatjes tot 3 mm zullen door botsing en windkracht over de grond gaan rollen. Deeltjes kleiner dan 0,08 mm kunnen na verstoring gemakkelijk door verticale en horizontale luchtstromen over grote afstanden worden verplaatst. Naarmate het harder waait zal de bovenlaag sneller uitdrogen, zal het dus eerder gaan stuiven (met name bij de zandkoppen) en zal bovendien de hoeveelheid opgenomen materiaal toenemen. Doordat deze lading de snelheid van de wind remt, wordt op een gegeven moment een evenwichtstoestand bereikt waarbij evenveel deeltjes worden opgenomen als afgezet. Een dergelijke situatie wordt echter pas na vijftig tot honderden meters windwaarts bereikt. Hoe groter dus de ononderbroken strijklengte over een aaneengesloten veld des te meer materiaal wordt verplaatst. Overigens is deze evenwichtstoestand betrekkelijk. Voor stofdeeltjes is er nauwelijks sprake van een maximum door de snelle verdunning die optreedt. Grotere deeltjes komen even verderop weer neer, zodat de netto hoeveelheid verplaatst materiaal aanzienlijk minder is dan de hoeveelheid welke gedurende een storm in beweging wordt gebracht. Dit geldt echter niet voor de fijne frakties, deze verdwijnen onherroepelijk uit de bovenste laag. Daarmee is de

winderosie een zichzelf versterkend proces: laag gehalte aan organische stof heeft stuiven tot gevolg; stuiven betekent extra verlies aan organische stof hetgeen weer leidt tot snellere en verhoogde erosie.

De directe en indirecte gevolgen van winderosie zijn aanzienlijk en zullen zonder maatregelen blijven toenemen. Volgens PEERLKAMP (1970) kan bij een windsnelheid van 10 m/s de hoeveelheid getransporteerd materiaal wel 15 ton per hectare per uur bedragen en bij 15 m/s (7-8 Beaufort) 50 ton per hectare per uur, hetgeen neerkomt op een laag van ongeveer 5 mm. In enkele dagen kan op die manier 5 tot 10 cm van de bouwvoor wegstuiven. Verlaging van het oppervlak levert op zichzelf weinig problemen op (al kan dit in een extreem geval leiden tot aanpassing van het ontwateringssysteem). Maar tevens gaat hierbij de fijne fraktie verloren. Bij een storm gedurende enkele dagen in 1949 verdween + 7 cm bouwvoor. Uitgaande van een organisch stofgehalte van 15% en een bouwvoordikte van 20 cm ging hierbij bijna een derde verloren. Een verlaging tot 10%!! Stuifgevaar bestaat er gedurende meerdere perioden in het jaar. Stofstormen in september komen voor. De hierna opgesomde gevolgen zijn echter betrokken op de periode van januari tot en met mei, gedurende welke periode de combinatie van droog weer, harde wind en braak of pas ingezaaid veld zich voor- doet (zie ook bijlage III).

De gevolgen van de winderosie kunnen als volgt worden samengevat:

1. W e g s t u i v e n v a n d e b o v e n g r o n d !

- verlaging van de oppervlakte
- zandkoppen stuiven het eerst en breiden zich uit
- verlies organische stof, bodemvruchtbaarheid en biologische activiteit, waterhoudend vermogen
- mede wegstuiven van organische en anorganische meststoffen, zaden, insecticiden, fungiciden en dergelijke
- blootstuiven aardappels, jong bietengewas
- verspreiden van onkruidzaden, ziekten en dergelijke.

2. S c h a d e e n o n g e m a k t i j d e n s t r a n s p o r t

- kapotschuren van staand gewas,
- hinderen van bewerkingshandelingen

- stofproblemen voor mens en dier (ogen, longen, zicht)
- luchtvervuiling op grote hoogte

3. N a d e l i g e g e v o l g e n b i j s e d i m e n t a t i e

- volstuiven sloten, greppels en dergelijke
- bedelven zaaigoed, pootgoed, jong gewas
- afzetten van stof in huizen, kantoren enz.
- watervervuiling (door nutriënten en andere stoffen)

De nadelige gevolgen voor de landbouw omvatten extra kosten voor bewerking, meststoffen, herinzaai; verminderde opbrengst als gevolg van kortere groeiperiode alsook directe verliezen door zandstraling en bedelving. Door overwaaien van allerlei ongewenste stoffen en bodemmateriaal wordt schade toegebracht aan het milieu. Er worden kosten gemaakt voor schoonmaak en herstelwerkzaamheden. KUIPER (1978) vermeldt jaarlijkse stuifschade te Tiendeveen, vooral bij bieten, waar deze kan oplopen tot 800 - 1000 gld/ha. De ramingen van de totale schade zoals onder andere genoemd door LUMKES e.a. (1973) belopen 10 tot 20 mln gulden. Hierin zijn waarschijnlijk een aantal van de hierboven genoemde indirecte gevolgen niet meegerekend. Ook de voortschrijdende verlaging van het natuurlijk vruchtbaarheidsniveau en het vochthoudend vermogen zijn hierin niet opgenomen. Bij een stuifgevoelige oppervlakte van $\pm 75\ 000$ ha wordt er dan, nationaal-economisch gezien, een gemiddelde jaarlijkse schade geleden van ver boven de 200 gulden per hectare. Dit betekent dat afgezien van een mogelijke toekomstige catastrofe, erosiebestrijding en bodembescherming niet alleen noodzakelijk zijn uit overwegingen van milieubehoud, maar ook economische betekenis hebben.

3. BESTRIJDINGSMIDDELEN EN METHODEN

Bestrijding van de winderosie kan langs twee wegen worden aangepakt:

- a. verminderen van erosiegevoeligheid van de bodem, en
- b. vertragen van de windsnelheid nabij het bodemoppervlak.

De meeste maatregelen voldoen aan één van deze condities, enkele aan beide. In vrijwel alle gevallen betekent het echter 'slechts' het afstoppen van het erosieproces, waarbij de huidige bodemtoestand wordt geconsolideerd. Alleen bij toevoeging van organische stof is er sprake van een daadwerkelijke omkering van het proces.

Verminderen van de erosiegevoeligheid kan worden bereikt door het vergroten van het gehalte aan het oppervlak aan niet erosieve deeltjes en aggregaten, door vergroting van de samenhang tussen erosieve deeltjes en aggregaten, en door afdekken van de bodem. Vergroting van samenhang wordt verkregen door verhoging van het vochtgehalte en vergroting van het adsorptiecomplex als belangrijkste beïnvloedende bodemeigenschappen (zie deel II). Dit kan worden bereikt door toevoeging van organische stof, klei, kunstmatige bindmiddelen en water. Grondbewerking bij een bepaald vochtgehalte geeft een kruimelstructuur in de ongevoelige fracties; grof zand en grind, regelmatig over de oppervlakte verdeeld (>60%) geven afdoende bescherming. Bedekken met kunstmatige middelen, stro-(matten) en plastic kan tijdelijk een goede bescherming bieden. Stoppel en gewasbedekking geven door hun wortelstelsel aan de bodem meer samenhang en remmen bovendien de wind.

Vertragen van de windsnelheid kan daarnaast worden bereikt door elke vorm van verruwing, van grote grondbewerking tot en met meters-hoge obstakels zoals windsingels. Afgezien van windremming wordt hierbij tevens de veldlengte (strijk lengte) verkort.

Lutum

Toevoegen van klei is een zeer effectieve maatregel. Verhoging van het lutumgehalte tot 10% maakt bij het bestaande humusgehalte, de bodem ongevoelig voor winderosie (KNOTTNERUS e.a., 1972). Dit vraagt echter een welhaast onmogelijke investering (verspreiden van circa 300 m³ slib per ha, bij een lutumgehalte van 50%). Daarnaast bestaat er enig gevaar voor verspoeling van de klei, hetgeen vorming van een slemplaag bijvoorbeeld bij de overgang naar het zand, tot gevolg kan hebben.

Organische stof.

Hoewel in de literatuur organische stof over het algemeen niet

onverdeeld gunstige werking wordt toegekend lijkt toevoeging daarvan in het geval van de Veenkoloniën voor de hand liggend. Opvoeren tot een gehalte groter dan 7 à 10% effectieve organische stof (colloïdaal) maakt de bodem vrijwel ongevoelig voor winderosie. In zekere zin wordt dat nu nog op nog niet grondverbeterde percelen gedaan door elk jaar 1 à 2 cm veen aan te ploegen. Verhogen van het organisch stofgehalte is echter nauwelijks uitvoerbaar. Door de snelle vertering moeten jaren achtereen grote hoeveelheden (50 - 100 ton/ha) worden toegevoegd om een relatief bescheiden verhoging van het gehalte te bewerkstelligen. Daarnaast is er veelal het probleem van de stikstofbinding, waardoor extra stikstofgiftten nodig zijn. Stalmest is nog het meest geschikt: geeft drie keer zoveel effectieve humus dan de meeste andere middelen (IB, 1979) en bindt geen extra stikstof. Andere effecten kunnen echter een belangrijkere rol spelen. Mulchen met stro, gewasresten (bietenloof e.d.), laten staan van een lange stoppel, hebben meer tot doel de bodem te bedekken of de wind te remmen. Hetzelfde geldt voor levende vegetatie als gras, klaver en wintergraan. De belangrijkste werking van organische middelen betreft echter het korte termijn effect. Jaarlijks vlak voor, of in de kritieke periode toevoegen van organische meststoffen en mulches is dan zeer effectief zonder evenwel blijvende werking.

Toevoegen van organische stof heeft daarnaast een aantal positieve en negatieve neveneffecten. Extra organische stof betekent meer beschikbaar vocht dat in droge jaren van groot belang kan zijn voor de gewasproductie (WIEBING e.a., 1977). Ook wordt bodemleven geactiveerd, hetgeen de structuur ten goede komt. Bezwaren zijn onder andere de extra bewerkingshandelingen, de moeilijkheden bij grondbewerking en inzaai, de in veel gevallen verhoogde stikstofbehoefte, de onkruidbestrijding, ziekten, verbranding en stank, alsook de beperkte beschikbaarheid (drijfmest).

Toepassingsmethoden:

1. Verspreiden van natte strooimest (15-30 ton per ha) of drijfmest (30-60 ton per ha), of een veelvoud voor blijvende werking met behulp van een strooi- of spuitwagen. Dunne gier kan eventueel worden verspreid via een beregeningsinstallatie. (KNOTTNERUS e.a. 1972; WOODRUFF e.a., 1974; IB, 1979).

2. Verspreiden van stadscompost (70 ton per ha) in zeer natte toestand of gemengd met extra meststoffen en zaad waarbij 30 ton per ha bleek te voldoen (KUIPER, 1978; KNOTTNERUS, 1976).
3. Opbrengen (spuiten) van zuiveringsslib (10-15 ton per ha) waarbij zowel slib als organische stof wordt toegevoegd (KUIPER, 1978); KNOTTNERUS (1974) spreekt over 50 ton per ha onverdund zuiverings-slib, liefst over een met stro bedekte grond gespoten. Behalve stadscompost kunnen uiteraard ook zuiveringsslib en stalmeest, gemengd met meststoffen en zaad, worden toegediend: h y d r o - s e e d i n g. In veel gevallen ontstaat bij deze behandelingen een korstje aan het oppervlak waardoor extra bescherming wordt geboden (KNOTTNERUS, 1980).
4. Mulchen met al of niet ter plaatse ontstane gewasresten zoals maisstoppel, bietenblad, stro (600-1200 kg per ha).
5. Andere vegetatieve bedekking zoals rogge, klaver, gele mosterd, enzovoort (LUMKES e.a., 1973).

Deze laatste twee categoriën komen later nog aan de orde.

Kunstmatige bindmiddelen en korstvormende middelen.

Het aanbod van dergelijke middelen is de laatste jaren overwel-digend en er is reeds veel onderzoek naar gedaan (zie deel II). Vele soorten stoffen worden aangewend: bitumen--emulsies, polyvinyl alcholen en -acetaten, latexemulsies, cellulose-achtige stoffen etc. De werking is over het algemeen tweeërlei: a. korstvorming, of b. aggregaatvorming. Bij de korstvormende middelen zoals bijvoorbeeld ook het geval is bij een aantal organische spuitmiddelen, wordt de bodem bedekt door een aaneengesloten laag, van zeer geringe dikte. Bij de aggregerende middelen worden aan het oppervlakte (na enige bewerking) min of meer stabiele aggregaatjes gevormd groter dan de erosiegevoelige frakties. Uit windtunnel- en veldproeven bleek een aantal middelen goed te voldoen. Voor continue toepassing in de akkerbouw blijken alle middelen gezien de geringe duurzaamheid echter te duur (meer dan 600 gulden per ha). Velen blijken na enige weken op te lossen in (regen)water en spoelen uit. Een enkele verstoring in de korst kan een startpunt voor erosie zijn, toch moet de kiem door de korst heen kunnen breken. Schurend zand van aangrenzende

percelen kan snel tot afbraak van de korst of aggregaatjes leiden. Bij winderig weer of oneffen bodem kan niet worden gespoten omdat het gevaar bestaat dat er geen aaneensluitende korst wordt gevormd. Niet alle middelen blijken onschadelijk voor het milieu, terwijl ook fixatie van voedingselementen kan voorkomen. Nader onderzoek aan de hand van éénzijdige criteria zal meer duidelijkheid moeten scheppen. Momenteel worden sommige van deze middelen in de Veenkoloniën in geval van nood aangewend. Toepasbaarheid bij een opkomend gewas is daarbij een belangrijke voorwaarde (zie o.a. KNOTTNERUS, 1980; KULLMANN e.a., 1978).

Water.

In veel van de hiervoor genoemde maatregelen speelt vocht een rol als bindmiddel. De werking van klei en humus geschiedt voor een belangrijk deel via de vochtbinding. Bij het opspuiten van veel middelen wordt directe bescherming, zij het van tijdelijke aard, geleverd door het vocht. Een natte toplaag stuift niet. Evenmin zal het stuiven bij hoge luchtvochtigheid. Instellen van een hoog voorjaarspeil zal, afgezien van de vele bezwaren daaraan verbonden, echter beperkt effect sorteren. De hoge droge zandkoppen zullen toch gaan stuiven en daarmee het proces in gang zetten. Beregenen heeft wel effect, en wel meer, naarmate het water vaker en in kleine hoeveelheden wordt toegediend. Beregening vraagt evenwel een grote investering, moet snel inzetbaar zijn en in werking blijven zolang het stuifgevaar aanhoudt.

Afdekken met mechanische middelen.

Een zeer effectieve, tevens bewerkelijke methode van erosiebestrijding is het afdekken van de bodem met stromatten, plastic folie, takkebossen en dergelijke. Toepassing in de akkerbouw is evenwel uitgesloten. Ook verspreiden van grind waarbij het oppervlakte aandeel minstens 50% moet bedragen, is effectief uit een oogpunt van erosiebestrijding, maar nauwelijks uitvoerbaar.

Grondbewerking.

Evenals vegetatie heeft ook het toepassen van aangepaste grondbewerkingsmethoden een tweeledig doel: enerzijds de vorming van aggregaten (kluiten en kruimels), anderzijds door verruwing van het oppervlak de wind te remmen. Vooral in de Verenigde Staten zijn daartoe talloze vormen van grondbewerking ontwikkeld (BENNETT e.a., 1977). Deze situaties kunnen op verschillende wijze worden bereikt, waarbij bodemvochtspanning vaak een bepalende faktor is. De meeste methoden gaan uit van het principe van minimale grondbewerking, om de structuur zo weinig mogelijk te verstoren. Bij voorkeur wordt vóór de winter grof bewerkt en in het voorjaar de zaaibed-bewerking, inzaai, onkruid- en insektenbestrijding in één handeling uitgevoerd. Dit betekent onder andere, dat mechanische onkruidbestrijding tot een minimum wordt beperkt en er dus meer gebruik gemaakt wordt van chemische bestrijdingsmiddelen. Op zeer erosie-gevoelige gronden zoals grote delen van de Veenkoloniën, is hier echter maar beperkt succes van te verwachten. De gemiddelde windsnelheid boven de oppervlakte is weliswaar minder, maar boven de uitstekende kluiten of ruggen neemt de snelheid toe. Bovendien drogen deze delen sneller uit, zodat daar de winderosie zelfs eerder een aanvang zal nemen. In dat geval is het zandvang-effect het belangrijkste, maar van beperkte duur. De stofdeeltjes gaan dan in ieder geval toch verloren. In bepaalde gevallen (b.v. wheel-track planting) kunnen verschillende effecten tegelijk worden bereikt: vorenvorming, zaaien of poten en compactie hetgeen meer vochtnalevering geeft, terwijl stoppels en of mulch op het veld kunnen blijven (VOORHEES e.a., 1979). Toepassing van speciale bewerkingsmethoden in het Veenkoloniale gebied zal dan ook voornamelijk op dit principe zijn gebaseerd.

Continue vegetatie.

Een redelijk gesloten gewasbedekking geeft een zeer goede bescherming tegen winderosie, voornamelijk door windremming. Bij het huidige bodemgebruik (aardappel 50%, bieten 25% en granen 25%) is in de periode juni tot september-oktober het stuifgevaar dan ook nihil. Vegetatieve bedekking gedurende overige delen van het jaar (vooral het voorjaar) kan op verschillende manieren worden bereikt:

a) in gras leggen, b) zaaien van groenvoeders als klaver, lupinen, gele mosterd, c) zaaien van wintergewassen als winterrogge.

Daarnaast biedt het laten staan van een lange graan- en maisstoppel de mogelijkheid om langs vegetatieve weg de wind te remmen en de bodem te verankeren. Deze methoden hebben echter wel enige bezwaren. In gras leggen is zeer afdoende maar tevens zeer ingrijpend. Groenvoeders en wintergranen brengen extra werk met zich, problemen bij zaaibedpreparatie en onkruidbestrijding. In mindere mate gelden deze bezwaren ook voor de mais- en graanstoppel. De meest bruikbare methode lijkt voornamelijk de toepassing van winterrogge. Deze wordt breedwerpig of in kruisverband (KNOTTNERUS, 1980) gezaaid, bij voorkeur zo vroeg mogelijk in de periode half september tot eind november. Vervolgens wordt de rogge, voor de inzaai (bieten) of na opkomst (aardappel) doodgespoten, waarna de dode mulch nog enige tijd bescherming biedt. Over het algemeen worden hiermee goede resultaten bereikt. Laat gezaaide rogge verhoogt echter de kans op onvoldoende ontwikkeling bij het begin van de kritieke periode. Neveneffecten zijn onder andere de extra stikstofbehoefte (winterrogge, stoppel) of stikstof aanrijking (groenvoeders), vochtverlies (extra verdamping) hetgeen gunstig is in een nat, maar ongunstig in een droog jaar.

Vegetatie zal tevens werken als zandval. Stuivend materiaal van een naburig perceel wordt opgevangen en vastgelegd. Dat is ook het principe van strokenbouw, waarbij voornoemde gewassen slechts een gedeelte van de oppervlakte innemen, permanent (gras) of tijdelijk. De gewasstroken zijn daarbij enige rijen of één of meer meters breed; de onbegroeide stroken maximaal twintig meter. Ook aan deze methode zijn nogal wat bezwaren verbonden zoals ziektebestrijding, bewerikbaarheid, naast randakkerverliezen en dergelijke.

Barrières.

Vele mogelijkheden zijn hierbij denkbaar. Gewasbedekking zelf, graan- en maisstoppel, al of niet volgens het stroken systeem. Inrijden van stro in rijen (600 - 1200 kg per ha) gaf een goed resultaat (MEYER, 1975). Kunstmatige schermen zoals rietmatten, latwerk, plastic enz. Ook minder geordende vormen van verruwing

kunnen effectief zijn, zoals bijvoorbeeld op een proefboerderij stuiven voor een deel werd voorkomen door een groot aantal groentekisten over het veld te verspreiden. De meeste van deze methoden zijn echter voor een grootschalig akkerbouwgebied nauwelijks toepasbaar. Andere mogelijkheden zijn heggen, windsingels en houtwallen. Naar deze vormen van windremming is veel onderzoek gedaan, waaruit blijkt dat de effectiviteit nogal variabel is en van veel zaken afhankelijk: doorlatendheid, hoogte, lengte, windrichting etc. Hoewel de meningen enigszins uiteenlopen, blijkt een windsingel bestaande uit twee of drie rijen en een gelijkmatige doorlatendheid van ongeveer vijftig procent het best. Tot op een afstand van 20 à 25 maal de hoogte is er nog remmende invloed, terwijl de maximum snelheidsreductie ongeveer 50% is, op 5 tot 10 maal de hoogte. Bij een windrichting niet loodrecht op de windsingel is de effectiviteit minder, terwijl deze bij een hoek van minder dan 45° met de singel vrijwel nihil is. Dat betekent dat de afstand tussen de singels niet meer dan 500 m mag bedragen, bij een overwegend noord-zuid oriëntatie. Behalve windremming, hebben windsingels een groot aantal effecten en neveneffecten, positief en negatief. Bezwaren zijn onder andere verhoogde windsnelheid bij de uiteinden en wegdoorsnijdingen (te ondervangen), vogelschade, ziekten en plagen, vochtconcurrenties, en slechte afrijping. Voordelen zijn bijvoorbeeld gewas- en veebeschutting, verminderde verdamping. Totaal gezien blijkt er een licht positief (0 - 5%) effect te zijn ten aanzien van de gewasproductie, waarbij suikerbieten gunstiger (5-10%) reageren dan de aardappel (0-3%) (SPRIK, 1974). Daar staan echter areaalverlies en kosten van aanleg en onderhoud (+ 20 gulden per ha (BRONGEEST e.a., 1979)) tegenover, zodat het voordeel gemakkelijk in het tegendeel kan omslaan. Economisch gezien is dit zeker niet zonder meer de beste oplossing, al is de duurzaamheid groot. Het duurt 5 tot 10 jaar voordat de singel volgroeid is. De windremmende werking is nooit volledig, zeker niet in een bladloze periode, hetgeen eisen stelt aan de samenstelling. Landschappelijk gezien is deze maatregel bovendien het meest ingrijpend.

In dit verband moet nog gewezen worden op het verschil dat bestaat met houtwallen, waar de windremmende werking aanzienlijk

minder is en waar onregelmatige open plekken zelfs verhoogde kans op winderosie geven. Een laatste mogelijkheid wordt geopperd door WARTENA (1968), die ervan uitgaat dat een vermindering van de gemiddelde windsnelheid over een hele streek het best bereikt kan worden met een (macro-)verruwing van het landschap door bosjes, boomgroepen, singels, houtwallen en gebouwen. Op deze wijze wordt de kans op te hoge windsnelheden, en daarmee de kans op stuiven, kleiner, zonder deze echter geheel weg te nemen.

Windsingels, boomgroepen en bosjes passen echter niet direkt in de streekplannen, waarin het behoud van de open ruimte centraal staat. COETERIER (1974) beschrijft de resultaten van een enquête, waaruit, overigens op weinig overtuigende wijze, de voorkeur van de bewoners blijkt voor een open landschap.

Gras

Een reeds eerder genoemde, zeer rigoreuze en effectieve maatregel is het in gras leggen van een gedeelte van het gebied, waarop bijv. schapen en mestvee kunnen worden gehouden. Uit landschappelijk oogpunt levert dit weinig problemen op. Voor de boer destemeer, omdat hij de mogelijkheid en bereidheid moet hebben om deze omschakeling te maken. Enige bijkomende voordelen zijn onder andere de mestproduktie welke op andere percelen kan worden gebruikt, afzet voor groenvoeders en snijmais (waarvan uitbreiding tot 10% gunstig lijkt (HAG, 1978)).

4. SLOTSOM

Ter bestrijding van het v o o r t s c h r i j d e n d e gevaar van de winderosie in de Veenkoloniën is een complex van maatregelen de beste oplossing (zie ook tabel I):

- . zoveel mogelijk de ergste stuifgronden in gras leggen
- . op de overige zéér stuifgevoelige gronden overgaan op opnemen van meer graan of mais in het bouwplan, waarbij een lange stoppel achterblijft; en/of als beschermend wintergewas winterrogge of een groenbemester, welke doodgespoten of, bij voorkeur, deels geoogst zou kunnen worden ten behoeve van het vee
- . zoveel mogelijk aanleggen van beplantingen langs wegen, op erven, overhoeken en dergelijke

- . zo mogelijk jaarlijks het land bespuiten met gier, drijfmest, stadscompost of zuiveringsslib
- . in noodgevallen beregenen of toepassen van kunstmatige bodemstabilisatoren.

Via een dergelijke reeks van maatregelen, welke in totaal niet meer dan gemiddeld 250-300 gld per ha hoeft te kosten, is het mogelijk de Veenkoloniën voor verdere achteruitgang te behoeden en als landbouwgebied te bewaren. Daarbij is het noodzakelijk, dat de boer in staat gesteld en gemotiveerd wordt deze maatregelen te nemen. In bepaalde gevallen zal dat voor hem een netto verlies kunnen betekenen. 'Beheersvergoedingen' kunnen in dat geval een juiste vorm van ondersteuning zijn. Ook in landschappelijke zin worden enige offers gevraagd. Het is dan ook essentieel dat de belangrijkste, hieruit voortvloeiende planningselementen nu reeds bij de herinrichting worden ingepast.

Tabel 1. Samenvatting erosiebestrijdingsmaatregelen; effecten en kosten

Maatregelen	Toepassing		Effecten **						Voorge- stelde maat- regelen		Bron		
			hoeveelheid	frequentie	gld/ha*	gld/ha* /jaar	opmerking	Winderosie		Geweasproductie		Opp.(% van 75 000 ha)	Gemidd.kstn per ha p/jaar
								korte termijn	lange termijn				
1. Klei opbrengen	250 m ³ /ha	eenmalig	10 000	1 000	verhoging lutum- gehalte	++++	++++	+			ICW (mondeling) (1980)		
2. Zuiveringsslib	15 ton/ha	1x per 2 jaar	400	200	verhoging lutum- en org.stofgehalte	+++	++	+	5	10	KNOTTNERUS (1974)		
3. Gier, drijfmest	40 ton/ha	jaarlijks	875	875	directe bescherming + consolideren org. stofgehalte	+++	+	++	10	87	ZASLAVSKY (1977)		
4. Stadscompost	70 ton/ha	jaarlijks	1 000	1 000	idem	+++	+	++	10	100	Idem KNOTTNERUS (1976)		
5. Hydroseeding (gras)	30 ton/ha	1x per 5 jaar	3 000	600		+++	+	++			KNOTTNERUS (1976)		
6. Chemische prepa- raten (korst- en aggregaatvorming)	variabel	noodgevallen	600	600	directe bescherming	+++	0	0	5	30	ZASLAVSKY (1977) KNOTTNERUS (1980)		
7. Beregenen	5-10 mm	noodgevallen		60 ↑ 600?	directe bescherming (installatie aan- wezig)	+++	0	0	5	3	WDr. (1979)		
8. Grondbewerking		jaarlijks			stoppel- en blad- mulch extra stik- stof nodig	+		0/+					
9. Stro inrijden	0,7 ton/ha	jaarlijks	250	250	extra stikstof nod.	++	0	0/+			MEIJER (1975)		
10. Tussengewas (winterrogge)	80-120 kg/ha	jaarlijks	250	250	idem	++	0	0	50	125	ZASLAVSKY (1977)		
11. Windsingels	20 m/ha			70	pas na 5 à 10 jaren effectief; incl.grondkosten	++	++	0/+	60	40	BRONGEEST en PERLO (1979)		
12. Houtwallen/ verspreid	variabel 1-2%			70	idem	+	+	0					
13. In gras leggen	zandkoppen	eenmalig				++++	++++		?	-			
Gemiddelde kosten per hectare per jaar (75 000 ha):										295			

* De hier gegeven bedragen zijn meer of minder ruwe schattingen voor kosten van produkt en toevoeging daarvan; bijkomende kosten (zoals stikstof, chemische bestrijding) zijn hierin niet opgenomen

** positief effect - negatief effect 0 geen effect

Berekening: lage intensiteit → fijne druppel.
(Bespuiten) verwacht (gunstig)

Eveneens te gebruiken in de rooier

In rijpaten van spuitmachines te versinken

van te leiding- pomp aan uiteinden aan te sluiten

Ploegen is niet maar spuitmachine of diep cultivatoren.

Gradiënten 2 m op 20 m = 10 % =

1 mm op 1 ha = 10 m³
20 m³/water) →

DEEL II. ASPEKTEN VAN WINDEROSIE (literatuurstudie)

1. ALGEMEEN

Winderosie is een proces, waarbij door de krachten, uitgeoefend door de al of niet met deeltjes geladen luchtstroom, bodemdeeltjes worden losgemaakt (detrusie, abrasie, avalanching), getransporteerd (deflatie, efflatie, effluxie, extrusie) en onder invloed van de zwaartekracht gesorteerd worden afgezet (sedimentatie, accumulatie). De bepalende elementen hierbij zijn bodemeigenschappen en meteorologische gegevens, welke in het eerste deel van deze studie aan bod komen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan meting, omvang en gevolgen van winderosie, waarna tenslotte een overzicht volgt van bestrijdingsmethoden, -middelen en -theorieën.

Zoals er bij het erosieproces sprake is van uitwaaiing, zo geldt dit ook voor onderzoek en literatuur over dit verschijnsel. Na een eerste serieuze aanpak ongeveer vijftig jaar geleden (o.a. Bagnold) heeft het, vooral als gevolg van de grote omvang van dit probleem in de ontwikkelde landen, snel toenemende aandacht gekregen, resulterend in een stroom van publikaties. Daarin wordt meestal slechts één enkel aspect behandeld als verslag van een onderzoek, waaronder vele dupliceringen, bevestigingen en tegenspraken. Daarentegen is er wat betreft overzichtswerken een bescheiden aanbod. In de eerste plaats kan daarbij gewezen worden op: CHEPIL and WOODRUFF (1963), terwijl voor een theoretische beschouwing van het proces BAGNOLD (1941), EPPINK (1978) en CARSON (1971) en voor overzichten van uiteenlopende aard VAN EIMERN (1964), DAVIS en HARROD (1970) en FAO (1960) genoemd kunnen worden.

Een bescheiden plaats in de literatuur is er ook voor de sociale en economische aspecten. Dit is desto meer opvallend, omdat daar juist het grootste probleem ligt. Inzicht in het proces en zo mogelijk meer nog kennis van de bestrijding is wel aanwezig. De moeilijkheid

is echter deze kennis blijvend te effectueren. In het verleden beschreven SINGH (1957) en SINGH (1966) de weg van voorlichting en demonstratie (zie ook EPPINK, 1978). De laatste tijd echter is deze kant van het probleem meer in de aandacht gekomen. Recentelijk stelde BENBROOK (1979) een centrale overheidsaanpak voor, waarin subsidies, belastingmaatregelen en voorlichting een overwegende plaats innemen. Voorts is in tal van landen de wetgeving hierin een belangrijk instrument (DOUWES, 1978). Internationaal is op dit punt evenwel nog nauwelijks iets van de grond gekomen. Overigens geldt dit het hele probleem van milieubescherming, waarvoor een integrale aanpak vereist is. Op het probleem van winderosie in niet-agrarische gebieden, zoals duinen, kustvlakten en zandverstuivingen en de bestrijding daarvan wordt hier niet ingegaan. Voor een groot deel is het hierna beschrevene echter ook daarop van toepassing. Voor nadere bestudering wordt onder meer verwezen naar BAGNOLD (1941), BELLY (1964) en BRESSOLIER en THOMAS (1977).

Een algemene opmerking betreft het gebrek aan definiëring in de literatuur. Begrippen worden vaak niet of slecht gedefinieerd, hetgeen leidt tot uiteenlopende interpretatie. Symbolen worden soms niet benoemd en vaak ontbreekt bij getalswaarden de grootheid waarin deze gegeven zijn. Deze storingen leiden tot onleesbaarheid, bemoeilijken interpretatie en maken vergelijking van resultaten een hachelijke zaak. Hopelijk vertoont deze nota niet dezelfde gebreken. Voor de omschrijving van enkele begrippen wordt verwezen naar bijlage I, terwijl voor de verklaring van symbolen bijlage II (flap) steeds naast de tekst kan worden gehouden. Van sommige grootheden in de tekst wordt alleen de dimensie aangegeven. Andere grootheden en getalswaarden worden gegeven met eenheden in het S.i.-stelsel.

2. HET PROCES

2.1. Meteorologische factoren

2.1.1. De wind

Aan het bodemoppervlak wordt door de wind (= luchtstroming onder invloed van atmosferische drukverschillen en aardedraaiing) een tweetal krachten op de bodemdeeltjes uitgeoefend: een horizontale sleep- of schuifkracht ('drag') met de richting van de wind en een verticale- of normaalkracht ('lift') onder invloed van de snelheidsgradiënt in een vlak loodrecht op windrichting en bodemoppervlak.

Schuifkracht

Op het grensvlak met de in rust verkerende bodem wordt het horizontale moment van de langsstrijkende lucht, door moleculaire- en wervelmenging omgezet in een vertikaal moment. Hierdoor oefent de wind een schuifkracht uit op de bodem, terwijl omgekeerd de bodem een schuifkracht uitoefent op de wind. Als gevolg daarvan is de windsnelheid tot op zekere hoogte nagenoeg gelijk aan nul. Bij een zeer glad oppervlak bevindt zich direct daarboven een laminaire stromingslaag (eenparige stroming) van zeer geringe dikte. In werkelijkheid komt een aerodynamisch glad grondoppervlak vrijwel niet voor, en dus evenmin een dergelijke stroming. Zodoende is boven het grondoppervlak de luchtstroming vrijwel altijd in meer of mindere mate turbulent, dat wil zeggen: bij een windsnelheid groter dan $1 \text{ à } 2 \text{ m}^{-1}$, als gemiddelde van een niet-stationaire stroming (FAN en DISRUD, 1977) zal de lucht in alle richtingen bewegen met slechts een gemiddelde voorwaartse richting evenwijdig aan het aardoppervlak (WARTENA, 1968). Deze invloeden op de luchtstroming resulteren in een grote snelheidsgradiënt in de onderste meters (CHEPIL en WOODRUFF, 1963; WARTENA, 1968), welke goed beschreven kan worden met de volgende vergelijking (ontleend aan het werk van PRANDTL en VON KARMAN):

$$u = \frac{1}{K} u_* \ln \frac{z - z_d}{z_0} \quad (1)$$

(CARSON, 1971; CHEPIL en WOODRUFF, 1963; EPPINK, 1978); dat wil zeggen, een logaritmisch verloop met de hoogte. Daarboven neemt de windsnelheid lineair toe, tot op een hoogte van enkele honderden meters, de maximale waarde (gradiënt-wind) wordt bereikt (zie fig. 1; WARTENA, 1968).

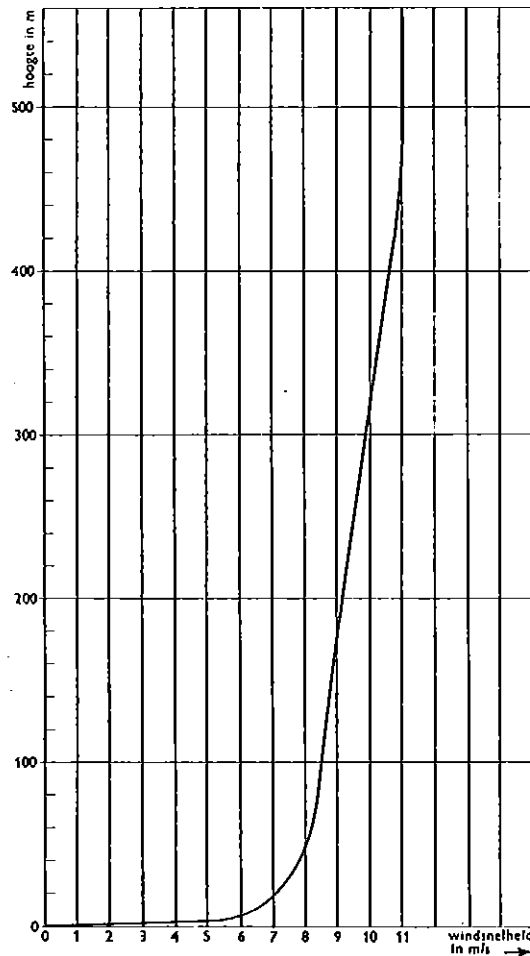


Fig. 1. Windprofiel (u) bij een bepaalde bodemruwheid (z_0)
 bron: WARTENA (1968)

De schuifsnelheid ('drag velocity') wordt bepaald door de schuifspanning op het grensvlak, waarbij bodemruwheid, viscositeit en dichtheid van de lucht een belangrijke rol spelen:

$$u_* = (\bar{\tau}_0 \rho_1^{-1})^{0,5} \quad (2)$$

$$\text{of: } \bar{\tau} = \rho_1 \cdot u_*^2 \quad (3)$$

$$\text{en: } \bar{\tau} = \rho_1 \cdot K_M \cdot du/dz \quad (4)^*$$

Coëfficiënt K_M in vergelijking 4 varieert met de ruwheid (z_0) van de bodem in die zin, dat een ruwer oppervlak een hogere schuifspanning (τ) en daarmee een relatief hogere schuifsnelheid (grotere sleepkracht) van de wind ondervindt. In principe betekent verruwing dus vergroting van de erosieve kracht van de wind. Verruwing heeft echter tevens een geleidelijke afname van de windsnelheid tot gevolg (WARTENA, 1968; zie fig. 2 en 3), hetgeen weer leidt tot een **a b s o l u t e** afname van de schuifsnelheid (fig. 4 en 5).

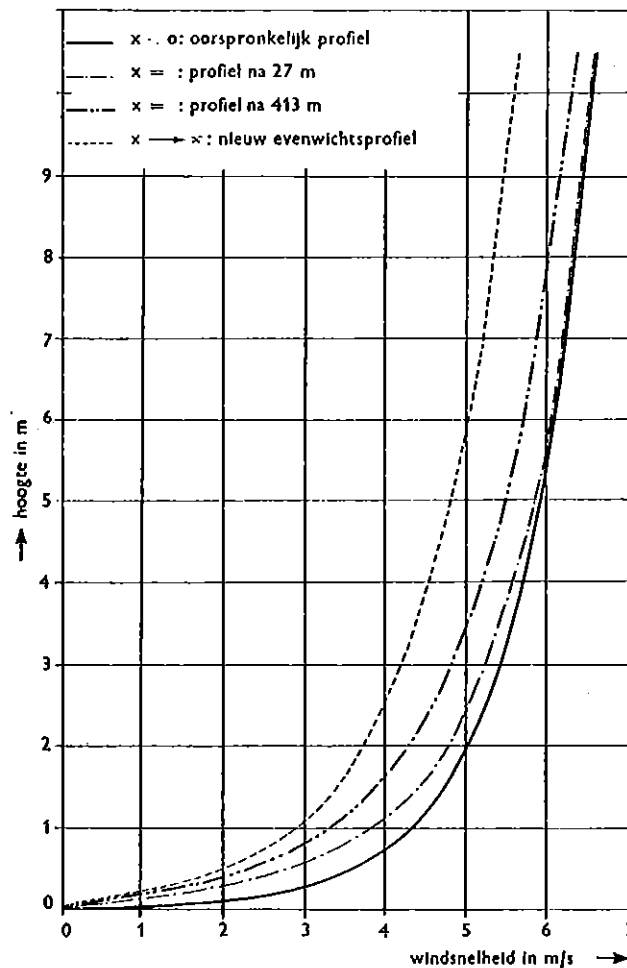


Fig. 2. Aanpassing van een windprofiel aan een veranderde bodem-
ruwheid. Oorspronkelijke ruwheid $z_0 = 1$ cm, nieuwe ruwheid
 $z_0 = 7,5$ cm. Bron: WARTENA (1968)

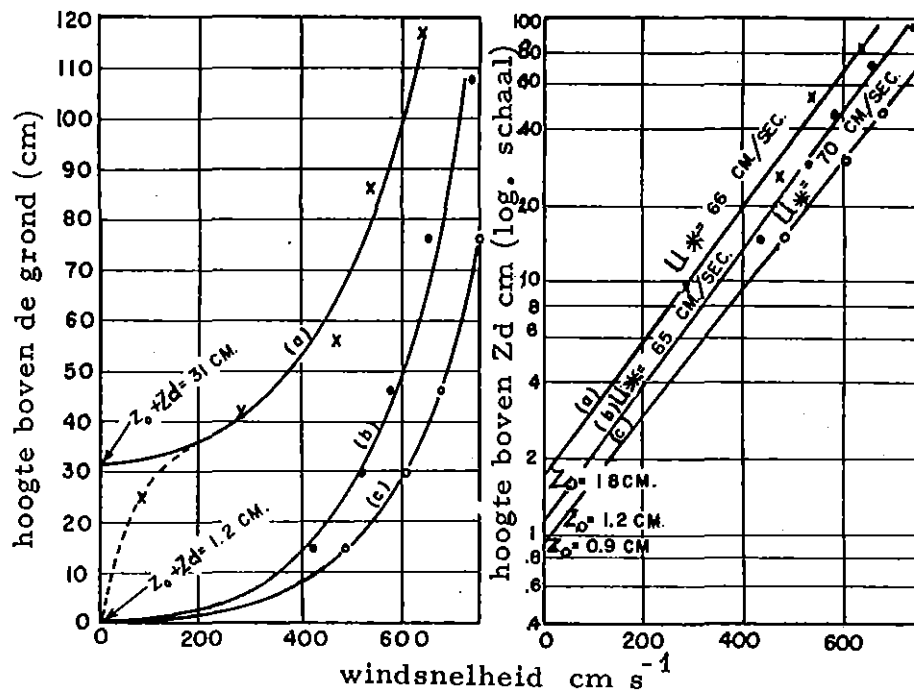


Fig. 3. Windsnelheidsprofielen gelijktijdig bepaald (zelfde wind) boven
a) sorghum-stoppel (hoogte 53 cm) en b) jong tarwe gewas (5 cm);
c) bij een andere wind in situatie b
bron: CHEPIL en WOODRUFF (1963)

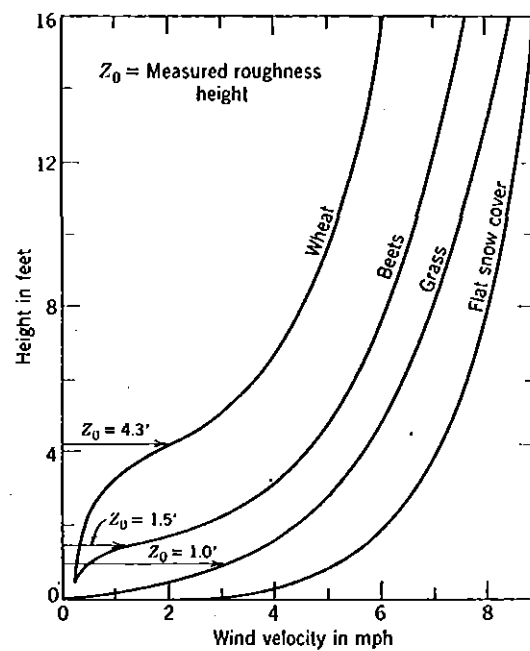


Fig. 4. Windsnelheidsverdeling boven verschillende bodemruwheid en
plantbedekking
bron: SCHWAB e.a. (1971)

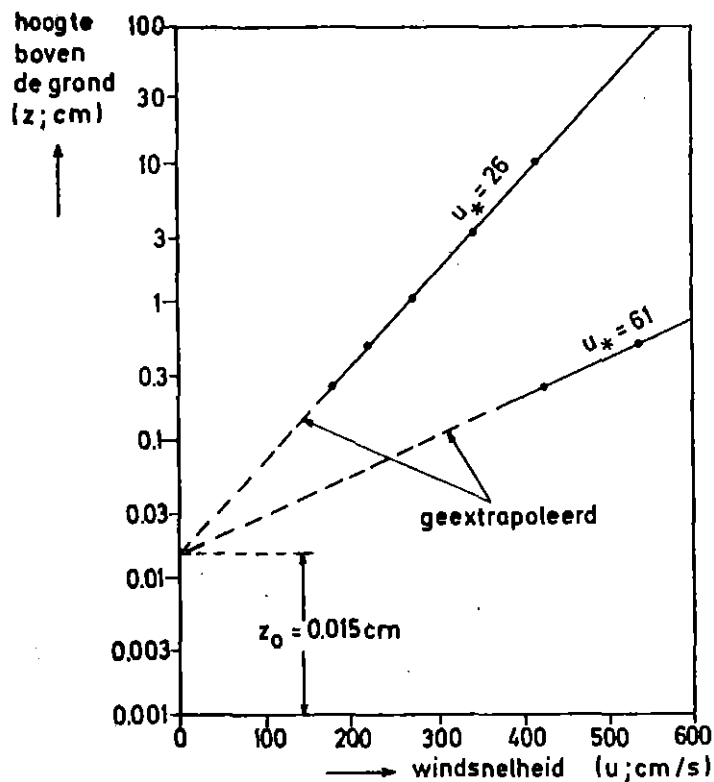


Fig. 5. Windsnelheidsprofiel in een windtunnel
 bron: EPPINK (1978)

Bovendien gaat het bij verruwing meestal om niet-erodeerbare obstakels, die een groot deel van de windenergie opnemen, waardoor het erodeerbare gedeelte netto minder schuifsnelheid ondervindt (CHEPIL en WOODRUFF, 1963; HUDSON, 1973, LYLES. e.a. 1974). In geval van een redelijk gesloten gewasbedekking vindt er tevens een verticale verschuiving (z_d) van het windprofiel plaats (zie fig. 3, 4), hetgeen echter op de vorm van de curve geen invloed heeft.* Dit betekent, dat naast de windsnelheid ook de ruwheid van het oppervlak bekend moet zijn. Met die twee gegevens is de schuifsnelheid (u_*) als index van de erosieve kracht van de wind bepaald.

*zie ook bijlage II^b

Normaalkracht

De snelheidsgradiënt in een vlak loodrecht op stroomrichting en grensvlak heeft een verschil in drukhoogte tot gevolg, waarbij de druk aan de bovenzijde van een element lager is dan aan de onderzijde, resulterend in een normaalkracht (Bernoulli-effect).

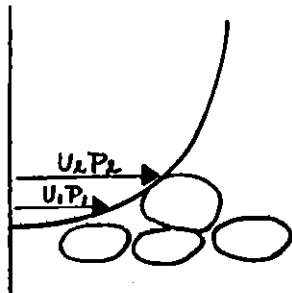


Fig. 6. Wet van Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \rho_1 v^2 + \rho g h = \text{constant}$$

De term $\rho g h$ is hierbij verwaarloosbaar klein.

$$p_2 - p_1 = \Delta p = \frac{1}{2} \rho_1 (u_1^2 - u_2^2) \rightarrow \Delta p < 0$$

Onder invloed van schuif- en liftkracht van de wind en de zwaartekracht, gaan bodemdeeltjes met erosieve afmetingen vibreren met een zekere frekwentie ('singing sands', BAGNOLD, 1941), afhankelijk van de windsnelheid, totdat bij overschrijding van de kritieke snelheid (u_c) de deeltjes plotseling losspringen uit hun omgeving. Dat hiervan inderdaad sprake is en dat dus de normaalkracht de beweging van bodemdeeltjes initieert, wordt door vele waarnemingen bevestigd (zie ook fig. 7) (LYLES en KRAUSS, 1971; BISAL e.a., 1962).

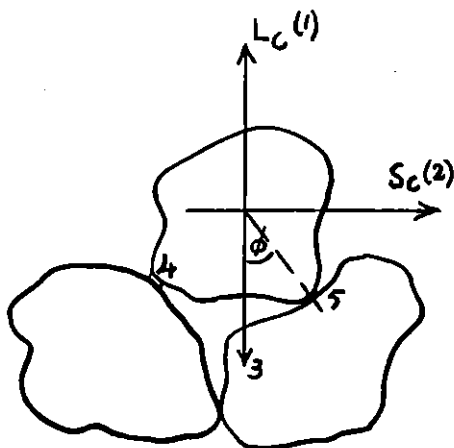


Fig. 7.

1. liftkracht (evenredig met Δp) (L_c)

2. schuifkracht (evenredig met $\bar{\tau}$) (S_c)

Bij wervelingen kunnen beide kortstondig aanzienlijk hoger zijn.

3. zwaartekracht (dichtheid deeltjes)

4. waterbinding, cohesiekrachten

5. vorm, ligging, grootte en pakking

Bij een ruwer oppervlak leidt de impulsuitwisseling tot een grotere snelheid aan het grensvlak, maar daarmee tot een kleinere gradiënt, waardoor de liftkracht vermindert!

Het loskomen van de bodemdeeltjes begint, wanneer de gecombineerde werking van sleep- en liftkracht als gevolg van de toenemende windsnelheid groter worden dan de schuifweerstand en andere krachten die de deeltjes op hun plaats houden. Bepalende factoren hierbij zijn (fig. 7): zwaartekracht, pakkingsdichtheid, korreldiameter, vorm, ligging en dichtheid van de deeltjes. Daarnaast spelen cohesieve krachten een belangrijke rol. Vele auteurs kennen bovendien aan de wind-turbulentie, wervelingen bij het grensvlak leidend tot drukverschillen, een belangrijke losmakende werking toe (BISAL, 1973; ROSCHKE, 1974).

Dit kritieke moment wordt beschreven volgens de algemene vergelijking (BAGNOLD, 1941):

$$u_{*c} = A(agd)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Hierin heeft de dimensieloze coëfficiënt A een waarde van ongeveer 0,1. Deze coëfficiënt is een functie van de aerodynamische ruwheid van het oppervlak (getal van Reynolds) en kan onder extreme omstandigheden, als er sprake is van laminaire stroming waarbij materiaaltransport is uitgesloten, oplopen tot 0,2 (zie o.a. LYLES, 1977). Fig. 8 geeft het experimenteel bepaalde verband tussen deeltjesgrootte en kritieke snelheid volgens Bagnold.

Voor discrete bodemdeeltjes geven CHEPIL en WOODRUFF (1963) de gemiddelde drempelwaarde volgens:

$$\bar{\tau}_c = 0,66 \, gD \, \rho^{\frac{1}{2}} \tan \phi \, \eta \, (1+0,75 \tan \phi)^{-1} T^{-1} \quad (6)$$

waarmee de werkelijke waarden goed worden benaderd (zie tabel 1).

Uit deze tabel blijkt tevens de goede overeenkomst met de uitkomsten van Bagnold voor discrete bodemdeeltjes.

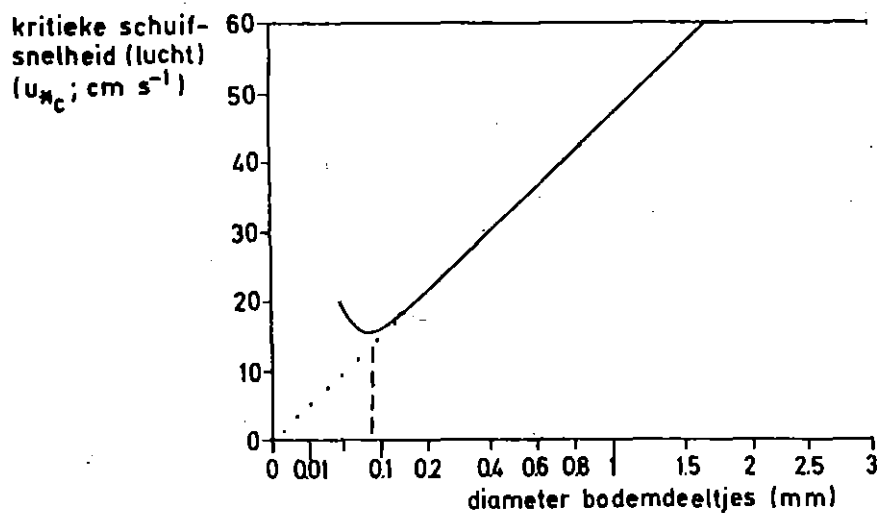


Fig. 8. Relatie tussen kritieke schuifsneldheid (u_{*c}) en deeltjes-afmeting (d)
bron: EPPINK (1978) naar BAGNOLD (1941)

Tabel 1. Berekende (met behulp van verg. 6) en gemeten kritieke schuifspanning (bron: CHEPIL en WOODRUFF, 1963)

Minimum korrel- diameter D	Relatieve dichtheid ρ	Berekende schuif- spanning $\bar{\tau}_c$ ber.	Gemeten schuif- spanning $\bar{\tau}_{gem.}$	Schuif- snelheid u_{*c}	Windsnel- heid u_c
(m) $\cdot 10^{-3}$	(kg m ³) $\cdot 10^3$	(N m ⁻²)	(N m ⁻²)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)
0,15	2,65*	0,07	0,06	0,22	3,43
0,30	2,65	0,14	0,11	0,30	4,65
0,60	2,65	0,27	0,23	0,44	6,72
1,20	2,65	0,54			
0,15	1,96**	0,05	0,04	0,18	2,80
0,60	1,80	0,19	0,15	0,35	5,43
1,20	1,74	0,36	0,36	0,55	8,41
2,00	1,65	0,58	0,52	0,66	10,10
3,36	1,52	0,89	1,03	0,93	14,22
4,75	1,55	1,29	1,40	1,08	16,58

*zandkorrels **aggregaatjes

De voorlaatste kolom (u_*) is berekend volgens vergelijking (2) met $\rho_1 = 1,20 \text{ kg m}^{-3}$ op basis van $\bar{\tau}$ gemeten. De laatste kolom (u) is berekend volgens vergelijking (1) met $K = 0,4$, $Z_0 = 0,02 \text{ m}$ (braak en vlak), $z = 2,0$ en $z_d = 0 \text{ m}$ en vervolgens vermenigvuldigd met $4/3$ om te komen tot waarden voor 10 m hoogte (normale waarnemingshoogte voor Nederlandse weerstation; KNMI, 1972). Uit de tabel 1 en fig. 8 zou de indruk kunnen ontstaan dat er geen limiet is betreffende diameter van bodemdeeltjes die door de wind kunnen worden losgemaakt. (Bij dezelfde z en z_0 levert windkracht 10 Beaufort ($= 28 \text{ ms}^{-1}$) een schuifsnelheid van $1,80 \text{ m/s}$). Uit vele experimenten blijkt echter dat de erosieve afmetingen variëren van ongeveer $0,85$ tot $1,0 \text{ mm}$ (discrete deeltjes) en $0,05$ tot $2,00 \text{ mm}$ (aggregaatjes), waarbij $0,1 - 0,2 \text{ mm}$ de fractie met de laagste kritieke schuifsnelheid is: 20 cm s^{-1} ($\bar{\tau}_c = 0,048 \text{ Nm}^{-2}$, $u_{*c} = 0,2 \text{ m s}^{-1}$) op 30 cm hoogte (BAGNOLD e.v.a.). Kleinere deeltjes blijken vrijwel niet vatbaar voor losmaken door de kracht van de wind. Echter, na op een of andere wijze uit hun rusttoestand te zijn gebracht, kunnen zij door hun relatief hoge oppervlakte / gewicht verhouding, gemakkelijk door de wind worden opgenomen en voorbewogen. Hieruit blijkt dat de vergelijkingen slechts beperkte geldigheid hebben. De veel genoemde veronderstelling dat kleinere deeltjes in de laminaire laag 'ondergedompeld' blijven en daardoor niet vatbaar zijn is weinig overtuigend. Slechts indien het oppervlak dusdanig geëffend is, dat de hoogteverschillen in de orde van de deeltjesgrootte $< 0,1 \text{ mm}$ zijn, zou daarvan sprake kunnen zijn. Waarschijnlijk zijn voornamelijk de cohesieve krachten, die bij deze deeltjes een grote rol spelen, hiervoor verantwoordelijk. Het is overigens duidelijk dat in het veld de omstandigheden nauwelijks overeenkomen met de condities in windtunnel-experimenten waar vaak gebruik wordt gemaakt van uniforme korrels en tamelijk stabiele luchtstroming. LYLES (1977) noemt het probleem van de bepaling van de deeltjesdiameter in een heterogene grond. Bij aanwezigheid van veel fijn materiaal worden de erosieve fracties gehinderd in hun beweging (CHEPIL en WOODRUFF, 1963). Turbulentie van reeds turbulente wind kan boven een open erodeerbaar veld tot aanzienlijke drukverschillen leiden, waarbij de eerder beschreven

theoretische benaderingen nauwelijks nog opgaan. Sommige auteurs FAN en DISRUD, 1977, ROSCHKE, 1974) beschouwen de erosieve kracht van de wind voornamelijk als gevolg van een regelmatige opeenvolging van windvlagen, waarbij veel hogere snelheden worden ontwikkeld. Roschke verklaart daarmee onder andere het ontstaan van grote open plekken in een bos, zoals ook in Nederland gebeurde tijdens de storm van januari 1977.

Het erosieproces

Op het moment dat de schuifsnelheid groter is dan de kritieke waarde, wordt de evenwichtstoestand doorbroken en zal het erosieproces een aanvang nemen. Door de normaalkracht wordt het deeltje over een geringe afstand omhoog getild (enkele mm's tot 2,5 cm CHEPIL en WOODRUFF, 1963). Door wervelingen kan het deeltje verder omhoog gebracht worden. Volgens HUDSON (1973) speelt hierbij onder andere ook het Venturi-effect een rol: door snelheidsverschil tussen en afbuiging van boven en onder een deeltje langsstromende lucht ondervindt dit deeltje een netto opwaartse kracht (zie fig. 9). Over het algemeen echter zullen de eerste deeltjes, aan het begin van een veld, niet veel hoger rijzen.

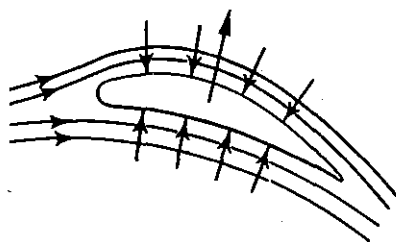


Fig. 9. Luchtstroming rond een gebogen oppervlak, resulterend in een netto opwaartse kracht

bron: HUDSON (1973)

Onder invloed van de hogere windsnelheid met toenemende hoogte worden de deeltjes versneld voortbewogen, daarbij onder invloed van de versnelling van de zwaartekracht een neergaande beweging ondervindend (zie fig. 10). Door deze invloeden komt een deeltje met verhoogde kinetische energie en onder een flauwe hoek weer neer (saltatie).

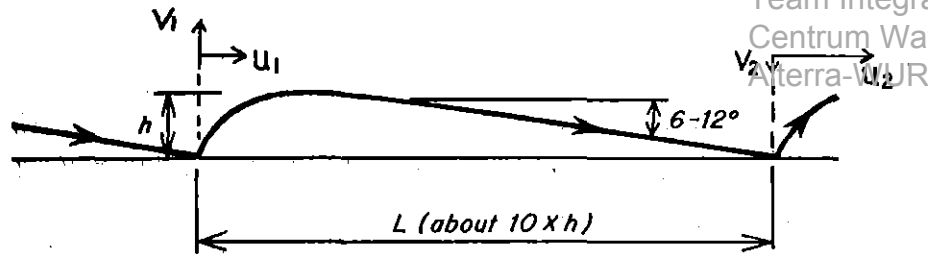


Fig. 10. Beweging van een bodemdeeltje in saltatie
bron: HUDSON (1973), BAGNOLD (1941)

Het proces wordt gecontinueerd door botsing met een of meer andere deeltjes van volledig elastisch (waarbij de eigen beweging versterkt wordt voortgezet), tot volledig inelastisch, waarbij alle energie wordt overgedragen aan andere deeltjes, die daardoor in beweging worden gebracht (avalanching).

Van het geërodeerde bodemmateriaal beweegt 50 tot 80% zich voort via saltatie (zie fig. 11), waarbij de spronghoogte zelden meer dan 1 à 1,5 meter is. Het grootste deel vindt in de onderste decimeters boven het oppervlak plaats (90%), terwijl de helft zelfs niet verder stijgt dan enige centimeters.

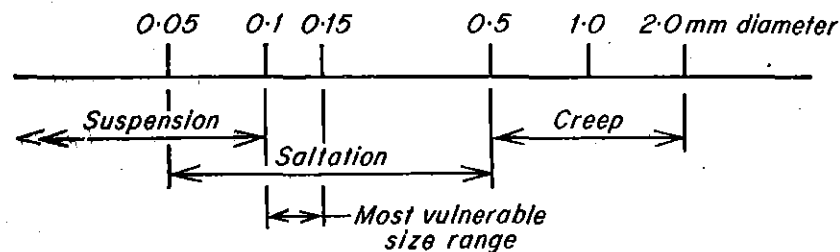


Fig. 11. De aard van de beweging van bodemdeeltjes als functie van hun afmeting
bron: HUDSON (1973)

Deeltjes groter dan 0,5 à 0,8 mm tot 3 à 4 mm komen niet van de grond los, maar worden wel door botsingen en windkracht voortbewogen

(5 - 25%) (creep). Deeltjes kleiner dan 0,08 à 0,1 mm kunnen, indien eenmaal los van de grond, door betrekkelijk geringe luchtbeweging over grote afstand en hoogte worden meegevoerd (suspensie). Opwaartse luchtstromen van 3 tot 5 km/h kunnen de deeltjes tot in de 'jet'-streams meevoeren waar snel transport over grote afstand mogelijk is. Zeer kleine deeltjes ($< 0,05$ mm) worden pas na verstoring opgenomen als saltatie en/of creep reeds plaatsvinden, of door andere mechanische verstoring (betreding, machines e.d.). Afhankelijk van de hoeveelheid fijn materiaal in de bodem kan het aandeel dat in suspensie wordt voortbewogen 3 tot 40% bedragen. (CHEPIL e.a., 1963; BAGNOLD, 1941; e.v.a.).

Winderosie is daarmee een zichzelf versterkend proces, totdat er een nieuwe evenwichtssituatie intreedt. Als de wind geladen raakt met deeltjes verandert het stromingsproces, omdat er nu niet meer sprake is van een in rust verkerend oppervlak, maar een bewegend oppervlak. Een gedeelte van de energie gaat verloren bij het transport van de deeltjes, terwijl ook de ruwheid verandert. Door deze invloeden wordt de lucht in de onderste lagen geremd totdat deze op een hoogte z_0^I een zekere stationaire drempelwaarde bereikt (u_d). Daardoor verandert ook de schuifsnelheid. Vergelijking (1) wordt dan:

$$u = \frac{1}{K} u_*^I \ln \frac{z - z_d}{z_0^I} + u_d \quad (7)$$

of

$$u_*^I = (u - u_d) K \left(\ln \frac{z - z_d}{z_0^I} \right)^{-1} \quad (7a)$$

De snelheid u_d op hoogte z_d is constant en onafhankelijk van de windsnelheid.

Uit deze constatering blijkt tevens, dat het proces bij een lagere schuifsnelheid dan u_{*c} en dus ook bij een lagere windsnelheid in stand kan worden gehouden. Fig. 12 toont het verschil in windsnelheidsprofielen voor geladen en ongeladen wind (BAGNOLD, 1941; CHEPIL en WOODRUFF, 1963). Hieruit blijkt, dat bij hardere wind en dus hogere schuifsnelheid, b e n e d e n de hoogte z_0^I een lagere

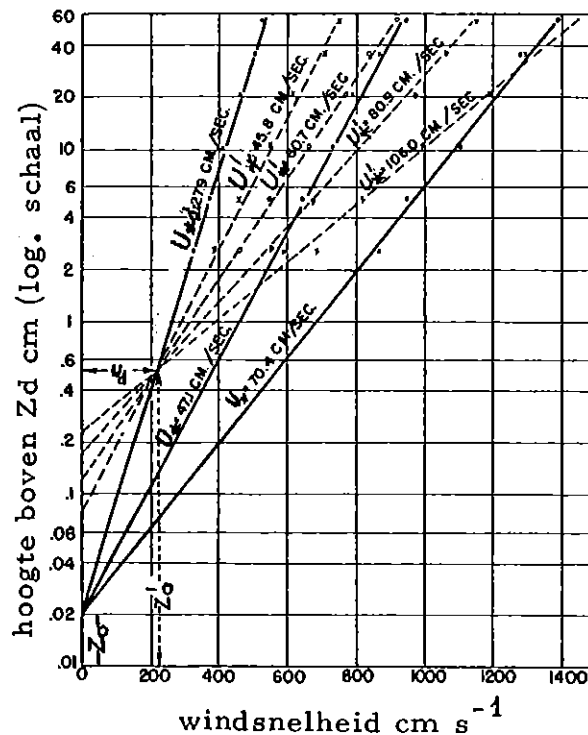


Fig. 12. Windsnelheidsgradienten boven een eroderend (-----) en een niet-eroderend (————) (met water gefixeerd) oppervlak
 $u_c = 214 \text{ cm s}^{-1}$; $z_0 = 0,02 \text{ cm}$ en $z_0^1 = 0,5 \text{ cm}$
bron: CHEPIL en WOODRUFF (1963)

schuifsnelheid bestaat; dat wil zeggen, dat bij hogere windsnelheid de deeltjes concentratie groter is, waardoor een grotere afname van de snelheid wordt gevonden. Als er voldoende erodeerbaar materiaal in de toplaag aanwezig is, wordt dus bij een bepaalde windsnelheid, nadat het erosieproces op gang is gebracht, een maximum lading bereikt, waarbij de hoeveelheid opgenomen materiaal gelijk is aan de hoeveelheid die neerkomt.

Het bereiken van dit maximum is niet een tijds- maar een plaats- bepaald proces. Uit windtunnelproeven werd voor zeer erosiegevoelige grond (fijn zand) een minimum strijklengte van ongeveer 50 m en voor

nauwelijks gevoelige gronden 2000 m en meer gevonden. Een dergelijk maximum geldt echter niet voor de stofdeeltjes. Deze deeltjes worden snel naar grotere hoogte vervoerd, waarbij een sterke verdunning optreedt. Zolang het proces voortduurt zal de hoeveelheid opgenomen fijne deeltjes blijven toenemen!

Het proces van winderosie stopt door twee verschillende oorzaken:

1) Afname van de windsnelheid door atmosferische oorzaken of door obstakels in het pad van de wind betekent afname van de schuifsnelheid. De ladingscapaciteit zal afnemen, totdat de 'voortgangs'-drempelwaarde wordt onderschreden, zodat salterende deeltjes worden afgezet en rollende deeltjes tot stilstand komen. Grote deeltjes dichtbij, kleinere verder weg. Er worden dan ook geen stofdeeltjes meer opgenomen, maar sedimentatie daarvan zal pas bij zeer lage snelheden en op grotere afstand plaatsvinden (GILLETTE, 1977). Fig. 13 geeft het verband tussen sedimentatiesnelheid en deeltjesafmeting.

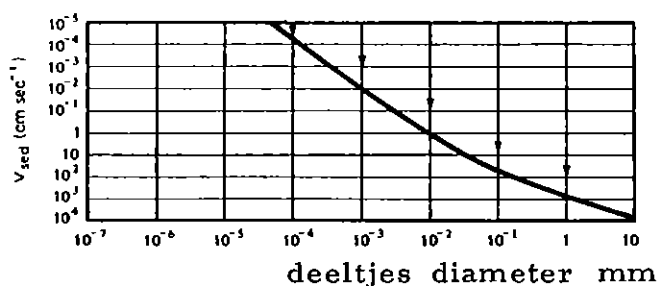


Fig. 13. Relatie tussen sedimentatiesnelheid (u_s) en deeltjesafmeting (d)

bron: BAGNOLD (1941)

2) Tijdens het stuiven verdwijnt de erosieve fractie uit de oppervlaktelaag, verhoudingsgewijs neemt dus de hoeveelheid niet-erodeerbaar materiaal toe. Totdat er een nieuw evenwicht is ingetreden: de bij die windsnelheid behorende schuifsnelheid neemt weliswaar toe door vergroting van de ruwheid, maar de sleepkracht wordt in toenemende mate opgenomen door niet-erodeerbare deeltjes, zodat het erosieproces wordt afgeremd (fig. 14).

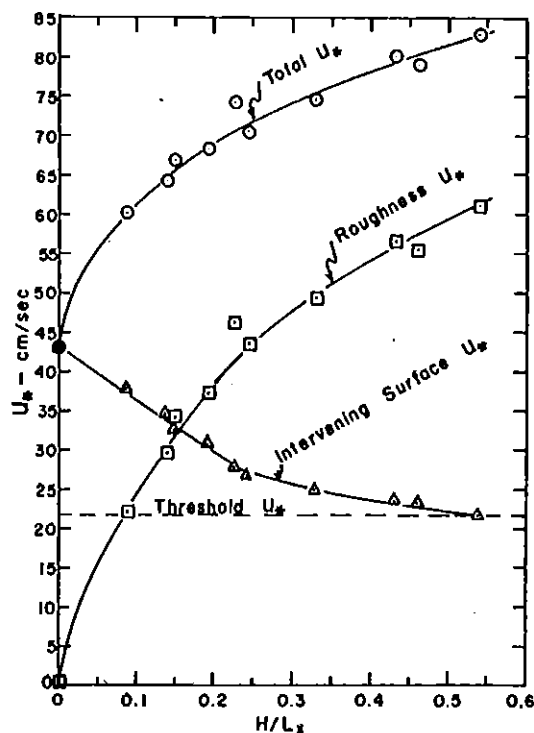


Fig. 14. Verandering van de schuifsnelheid (u_*) bij het bereiken van een nieuwe evenwichtstoestand door afname van het gehalte aan erodeerbare bodemdeeltjes. M/L_x is de hoogte van de niet-erodeerbare deeltjes gedeeld door hun onderlinge afstand
 bron: LYLES e.a. (1974)

Theoretisch is er geen absolute grens. Als het maar hard genoeg waait zal de hele erosiegevoelige fractie verdwijnen (desert-pavement!). Bovendien is de grens tussen erodeerbaar en niet-erodeerbaar onbepaald (windhoos). Voor normale omstandigheden echter geldt een gehalte van circa 50% niet-erodeerbaar oppervlaktemateriaal als grens voor erosiegevoeligheid van de grond (CHEPIL en WOODRUFF, 1963; e.v.a.)

2.1.2. Overige meteorologische factoren

Hoewel wind de belangrijkste factor is bij het winderosieproces spelen ook andere factoren een, soms beslissende, rol.

Neerslag

Vocht is een goed bindmiddel tussen discrete bodemdeeltjes. Een vochtige grond stuift niet (zie verder 2.2). Ook een droge grond zal bij regen niet stuiven. Kort na regen kan de oppervlaktelaag echter zeer snel uitdrogen en wel gaan stuiven. De belangrijkste aspecten van neerslag zijn hoeveelheid en verdeling over de tijd. Vaak een beetje regen is effectiever dan een enkele keer veel. LYLES en SCHRANDT (1972) vonden dat winderosie na regen met een lage intensiteit over het algemeen minder was dan na regen met een hoge intensiteit, terwijl regenduur geen invloed had. Factoren die hierbij een rol spelen zijn onder andere korstvorming door een sterke afwisseling van regen en uitdroging en uiteenvallen van aggregatie in erosieve fracties onder invloed van de kinetische energie van de regendruppels. Sneeuw bedekt de grond en levert na dooi vocht aan de bovengrond. In een vorstdroge periode echter kunnen sneeuw en het daaronder liggende materiaal alsnog gaan stuiven.

Luchtvochtigheid

Naast de neerslag heeft de relatieve luchtvochtigheid een belangrijke invloed. KNOTTNERUS en PEERLKAMP (1972) vonden bij een zeer erosiegevoelige dalgrond een toename van de kritieke windsnelheid van 8 tot 12 m s⁻¹, bij toename van de relatieve luchtvochtigheid van 55% tot 75%. Bij een luchtvochtigheid van meer dan 80 à 85% komt stuiven praktisch niet voor. Zij gaan ervan uit, dat bij die waarden de bodem voldoende vocht uit de lucht absorbeert. Fig. 15 geeft het verband tussen relatieve luchtvochtigheid en vochtspanning van de lucht bij 20°C (zie ook STAKMAN, 1968). Hieruit zou men kunnen opmaken dat bij een vochtspanning kleiner dan pF 5,5 het erosiegevaar nihil is (zie ook 2.2).

Temperatuur, straling

De invloed van temperatuur en straling op het erosieproces is voornamelijk beperkt tot hun invloed op de verdamping en de relatieve luchtvochtigheid. Bij hoge temperatuur en veel straling is de lucht droog en droogt de bovengrond snel uit, waardoor het erosiegevaar

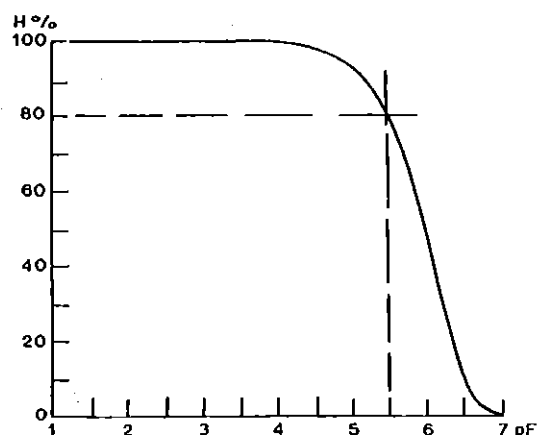


Fig. 15. Verband tussen pF en relatieve vochtigheid bij 20°C
bron: CRONEY e.a.(1952)

toeneemt. Hoewel dichtheid en kinematische viscositeit van de lucht temperatuursafhankelijk zijn (zie bijlage II) is de invloed daarvan gering, en wordt dan ook buiten beschouwing gelaten. Verwarming van de bodem kan overdag leiden tot verhoogde turbulentie, hardere wind en sterke opwaartse stroming.

Temperaturen beneden 0°C hebben invloed op de bodemgedragingen bij winderosie. Kapot vriezen van struktuurelementen en vorming van een losse kruimelstruktuur kan leiden tot een verhoogde erosiegevoeligheid.

Deels zijn deze weersinvloeden niet van elkaar te scheiden. Hun gecombineerde werking komt vooral tot uiting bij de seizoenverschillen. De meest erosiegevoelige perioden voor Nederland zijn winter en voorjaar (jan. - mei/juni): droge harde wind (Oostdijk), weinig neerslag en veel straling (zie bijlage III).

2.2. B o d e m k u n d i g e f a c t o r e n

De tweede erosiebepalende factor is de bodem, waarbij het gaat om de granulaire samenstelling en de bindende karakteristieken. Zandige- en zandgronden, overwegend bestaande uit zeer fijn tot matig grof zand (0,1 - 0,4 mm) en met een laag gehalte aan humus en kleideeltjes, zijn uitermate stuifgevoelig. Bestaat echter een gedeelte van het

oppervlak (50 - 55%) uit deeltjes groter dan 1 à 2 mm of aggregaatjes groter dan 2 à 3 mm, dan is een dergelijke bodem vrijwel ongevoelig voor winderosie. Grotere korrels kunnen bestaan uit grof zand en grind, dan wel uit min of meer stabiele structuurelementen, samengesteld uit meerdere deeltjes. Vegetatie heeft een belangrijke positieve uitwerking op de samenhang tussen de bodemdeeltjes, maar komt in deze paragraaf niet aan de orde. In deze paragraaf is de hoedanigheid van de bodem getoetst op erosiegevoeligheid. Een 'goede' bodem in deze zin kan 'slecht' zijn op basis van andere criteria (b.v. draagkracht e.d.) en andersom.

2.2.1. Textuur

Losse bodemdeeltjes hebben bij toenemende grootte, en dus toenemende gewicht/grootte of gewicht/oppervlakte verhouding, een steeds grotere windsnelheid nodig om in beweging te worden gebracht. Afhankelijk van de dichtheid ligt de bovengrens voor saltatie op 1 à 2 mm en voor creep op 3 à 4 mm (KNOTTNERUS en PEERLKAMP, 1972). CHEPIL vond de laagste kritieke schuifsnelheid voor discrete bodemdeeltjes met een diameter (zeef) van 0,1 - 0,2 mm. Bij een diameter van 0,84 mm (0,4 inch) is de kritieke schuifsnelheid dusdanig hoog, dat deze afmeting geldt als een tamelijk algemeen aanvaarde parameter bij de bepaling van de erosiegevoeligheid (PASAK, 1970). Deeltjes kleiner dan 0,05 mm kunnen vrijwel niet alleen door de wind in beweging worden gebracht, als gevolg van de cohesieve krachten die de deeltjes op elkaar uitoefenen. Bij de minste beroering echter worden deze labiele verbanden verbroken en kunnen de deeltjes door geringe horizontale en verticale luchtbewegingen worden opgenomen en over grote afstanden worden getransporteerd. Meestal echter komen deze deeltjes in geaggregeerde vorm met al dan niet erosieve afmeting in de bodem voor. Ook vorm, ligging en pakking van de deeltjes hebben invloed op de erosiegevoeligheid (zie vergelijking 6), al meent BISAL (1973) dat in een heterogene bodem de invloed van deze factoren ondergeschikt is aan turbulentie en liftkracht van de wind. Voor puur zand zijn de invloeden voornamelijk beperkt tot grotere vochtbinding bij dichte pakking (VOORHEES e.a., 1979). Bij fijne deeltjes en aggregaatjes is de betekenis groter.

2.2.2. Bindende eigenschappen

Hieronder wordt verstaan elke vorm van binding tussen afzonderlijke bodemdeeltjes en aggregaatjes. In volgorde van stabiliteit worden daarbij onderscheiden (CHEPIL en WOODRUFF, 1963):

- primaire, waterstabiele aggregaten, en
- secundaire, in water oplosbare (in primaire deeltjes of aggregaatjes uiteenvallend) aggregaten.

Deze aggregaten zijn opgebouwd uit losse bodemdeeltjes waarin de bindende elementen zijn: lutum, silt, humus, kalk, ijzer en aluminium oxiden, naast water en door bodemleven geproduceerd materiaal. Bij cohesieve materialen betekent afname van de afmeting van de deeltjes een relatief grote toename van de bindingskracht (SMALLEY, 1970).

- Korstvorming aan de oppervlakte als gevolg van afwisselende bevochtiging en droging en/of verslemping onder invloed van water en druppelinslag.

Organische stof

Organische stof komt in vele vormen in de bodem voor. Als levende en dode resten van overigens nog geheel herkenbare plantedelen, als veen in al zijn verschijningsvormen en als humus van verschillende samenstelling. Al deze vormen oefenen op uiteenlopende wijze invloed uit op de binding tussen bodemdeeltjes. Wortels en bovengenoemde planteresten binden structuurelementen en kunnen aan de oppervlakte bescherming geven door afdekking en windremming. Veengrond is vrijwel ongevoelig voor winderosie, al kan in bepaalde gevallen irreversibele indroging leiden tot de vorming van zeer erosiegevoelige bolletjes veen. In de Nederlandse hoogveenontginningsgronden (dalgronden) is de voorkomende organische stof maar voor een deel als bindmiddel (colloïdale humus) werkzaam. In bepaalde stadia van afbraak en humificatie kan de kittende werking groot, dan wel minder sterk zijn. De ene bron van organische stof breekt snel af en verliest daardoor na een groot effect in het begin, snel zijn waarde (groenbemester, vers organisch materiaal). Een andere, bijvoorbeeld stro heeft een minder structuurverhogende werking, maar blijft

langer werkzaam (MIEDEMA, 1950; IB, 1979). MONNIER (1965) gebruikt hiervoor het begrip 'facteur ishumique' (FI) waarbij een groenbemester een lage en stro een hoge FI heeft. De bindende werking van organische stof wordt voornamelijk bepaald door de adsorptiecapaciteit en daarmee de kationen- en waterbinding. Over het effect van organische stof bij winderosie lopen de meningen echter nogal uiteen. Structuur-stabilisatie blijkt over het algemeen niet synoniem met weerstand tegen wind-erosie. Dit komt enerzijds door de vorming van min of meer stabiele aggregaatjes in de erosiegevoelige fracties, anderzijds hangt de werking van organische stof sterk af van kalk- en vochtgehalte. CHEPIL en WOODRUFF (1963) halen diverse onderzoeken aan, waaruit blijkt dat een hoog gehalte aan humus leidt tot een verhoogde graad van erosie. Dit geldt des te sterker bij kleigronden, waar een hoog gehalte aan humus en kalk vorming van een erosiegevoelige kruimel-structuur bevordert. Bij eigen onderzoek constateerde zij een verhoogde weerstand kort na toevoeging van organisch materiaal, na enkele jaren echter een tegengesteld effect. HARTGE (1975) is optimistischer als hij schrijft dat organische stof bijdraagt tot bodem-stabilisatie, zelfs als er te weinig is voor aggregaatvorming; er moet echter altijd enig vocht aanwezig zijn. Ook DOLGILEVICH (1977) kent humus een positieve werking toe en wel meer naarmate er minder kalk in de bodem aanwezig is. Zijn onderzoek had overigens betrekking op kleiïge- tot kleihoudende gronden. Een zeer positief oordeel geven KNOTTNERUS en PEERLKAMP (1972) als zij schrijven dat op zandgronden met een humusgehalte van meer dan circa 7% het stuifgevaar nihil is. Algemeen gesteld lijkt de werking van organische stof effectiever naarmate er minder andere kittende elementen in bodem aanwezig zijn en voornamelijk tot stand te komen door vochtbinding.

Een tweede positieve factor is de verhoogde microbiologische activiteit in de bodem bij toenemend organisch stofgehalte. Deze organismen en hun afscheidingsproducten binden de bodemdeeltjes waarbij slijm en uitwerpselen een kortstondige en onder andere polysachariden een lange werkzaamheid hebben.

Lutum en silt

Veel eensgezinder is men in de literatuur ten aanzien van de bodemstabiliserende werking van lutum ($< 0,002$ mm), terwijl silt ($< 0,05$ mm) gelijk geacht wordt met humus, zonder evenwel de nadelige kenmerken met betrekking tot winderosie, te hebben. Dit is des te opvallender, omdat ook hier adsorptiecapaciteit (cation exchange capacity (CEC)) en waterbinding bepalend zijn, terwijl deze eigenschappen bij humus 2 tot 10 maal groter zijn dan bij lutum (mede afhankelijk van het type klei) en vele malen groter dan bij silt. Volgens CHEPIL en WOODRUFF (1963) hebben de eerste 5% silt of lutum een gelijk effect. Bij een groter gehalte vormt silt meer aggregaten dan lutum maar deze zijn in het laatste geval stabiel. De 'beste' grond, gezien de weerstand tegen winderosie, heeft volgens hen de volgende korrelgrootteverdeling: 20 - 30% lutum, 40 - 50% silt en 20 - 40% zand. Andere onderzoekers bevestigen de grote betekenis van klei. Volgens SHIYATYI e.a. (1972) en DOLGILEVICH (1977) wordt de weerstand van de bodem tegen winderosie voor 80 tot 90% bepaald door het kleigehalte, in veel mindere mate door het humusgehalte. PASAK (1970) gebruikt het lutumgehalte als indelingscriterium voor de erosiegevoeligheid. SIMMONS en DOTZENKO (1974) gebruiken CEC en vochtgehalte bij 15 atm. zuigspanning ($\approx pF 4,0$) als indicatie voor het kleigehalte en daarmee de erodeerbaarheid (zie fig. 16 a,b).

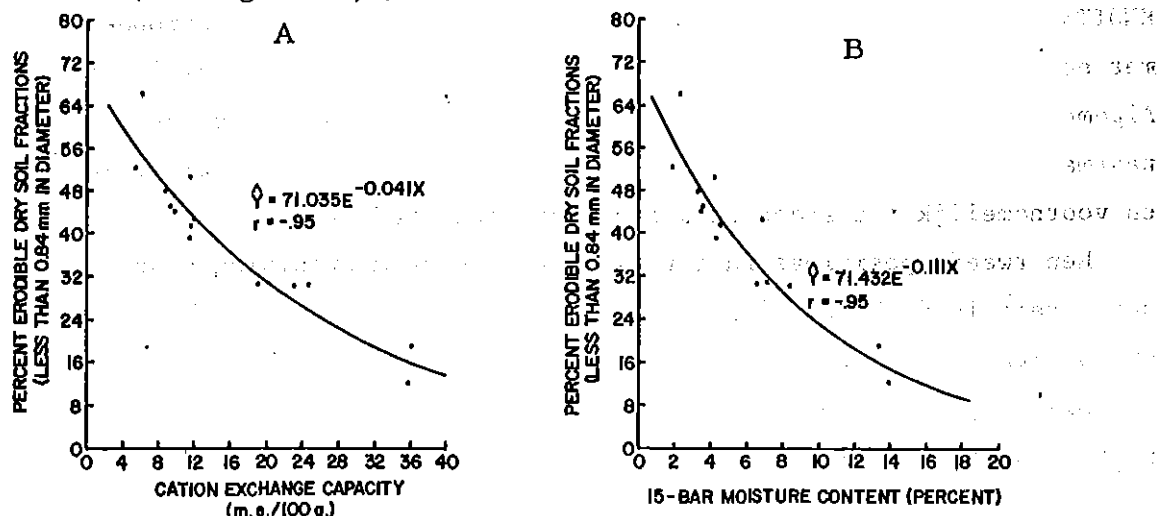


Fig. 16. Verband tussen CEC (a) en 15-bar vochtgehalte (b) en het gehalte aan droge bodemdeeltjes van erodeerbare afmeting ($< 0,84$ mm)
bron: SIMMONS en DOTZENKO (1974)

In enkele gevallen echter kan een hoog lutumgehalte leiden tot de vorming van zeer stabiele korrels met erosieve afmetingen (TELLER, 1972). Vooral bij montmorilloniet kan deze situatie zich voordoen.

Water

Uit het voorgaande is duidelijk dat het bodemvocht een beslissende factor is in de bodemweerstand tegen stuiven. Voornamelijk door de wateradsorptie bij klei, silt en organische stof, maar ook bij zandkorrels door de hoge oppervlaktetension van watermenisci bij de contactvlakken, waarbij compactie een belangrijke rol speelt.

Desondanks is het onderzoek naar de relatie water-winderosie tamelijk beperkt. De meeste onderzoeken wijzen uit dat bij een vochtspanning in de bovenste mm's van het profiel kleiner dan 15 bar ($\approx pF 4,0$; verwelkingspunt) de meeste gronden vrijwel ongevoelig zijn voor winderosie. Voor zand ligt dit omslagpunt wat lager. (SIMMONS en DOTZENKO, 1974; zie fig. 16).

CHEPIL (1956) stelt dat de bodemweerstand tegen winderosie toeneemt met toenemend vochtgehalte, waarbij de toename gelijk is aan $6W^2$, waarin W - het equivalente vochtgehalte - gelijk is aan de verhouding tussen het actuele vochtgehalte (gewichtsprocenten) en het vochtgehalte bij een vochtspanning van 15 bar (zie fig. 17). BISAL en HSIEH (1966) geven het verband tussen vochtgehalte en kritieke windsnelheid voor fijnzandige leem, leem- en kleigrond (fig. 18). Voor zavelgronden vond AZIZOV (1977) een logaritmisch verband tussen de kritieke schuifsnelheid en het vochtgehalte van 4 tot 20% (gewichtsprocenten). Beneden 4% was de invloed van het vocht nihil. Deze gegevens zijn echter nauwelijks overdraagbaar omdat hij werkte met gewichtsprocenten en bovendien verzuimde aan te geven op welke hoogte de windsnelheid werd gemeten.

Een andere benadering zou zijn uit te gaan van de luchtvochtigheid (zie fig. 15). Uitgaande van evenwicht tussen luchtvochtigheid en bodemvocht in de toplaag zou dat betekenen dat het kritieke punt ligt in de buurt van $pF 5,5$. In alle gevallen is deze benadering echter tamelijk academisch.

Ten eerste is bepaling van dergelijke vochtspanningen in het veld nauwelijks te verwezenlijken, ten tweede leidt een droge harde wind

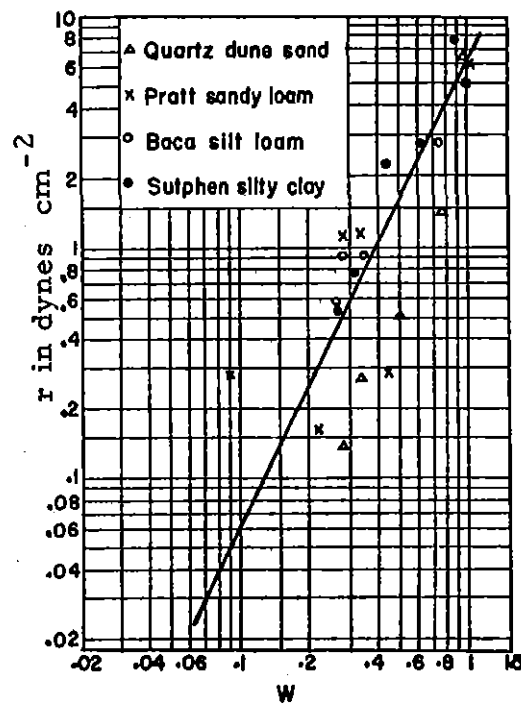


Fig. 17. Verband tussen weerstand r (door geadsorbeerde waterfilms) en het equivalente vochtgehalte W (zie blz. 42)
bron: CHEPIL (1956)

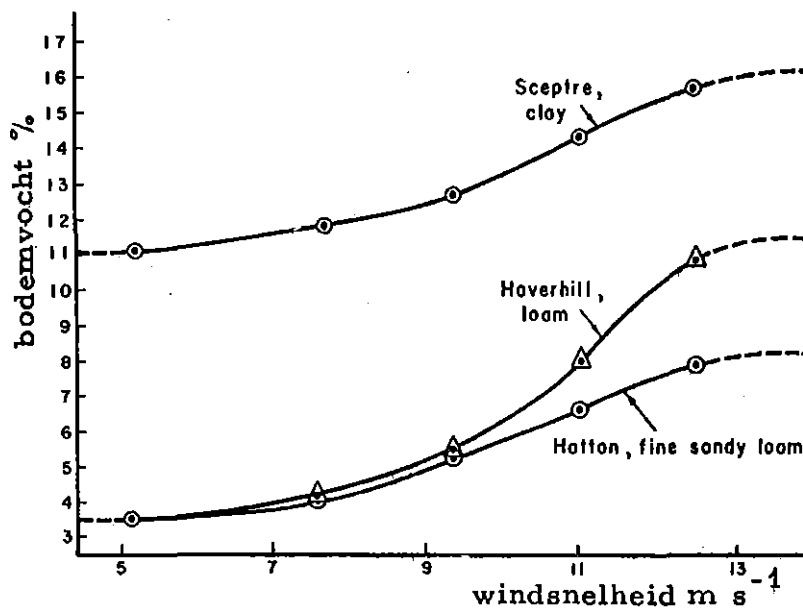


Fig. 18. Invloed van bodemvochtgehalte op de kritieke windsnelheid voor bodembeweging
bron: BISAL en HSIEH (1966)

tot hoge verdamping en afname van vochnaleveringssnelheid, zodat deze toplaag snel uitdroogt, zelfs bij evenwichtsvochtgehalten welke beduidend hoger zijn dan verwelkingspunt.

Dit wordt bevestigd door het bekende verschijnsel van stuivend zand op een vochtig strand. Beter lijkt het dan ook uit te gaan van een bepaalde evenwichtsvochtspanning van de bodem (bij een gegeven vochtretentie- of pF-curve) en de relatieve luchtvochtigheid om de kritieke schuifsnelheid te bepalen. Deze benadering is toegepast bij de berekening van de kans op erosie-gevoelige dagen in de veenkoloniën (bijlage III).

2.2.3. Overige bodemkundige factoren

C a l c i u m C a r b o n a a t. De gunstige invloed van kalk op de fysische (structuur) en chemische (pH-verhoging en Na^+ en Mg^+ verdringing) kwaliteit van de bodem is bekend (BODEMKUNDE, 1970). Met betrekking tot winderosie is de werking echter tegengesteld. In veel gevallen leidt toevoeging (met name op kleigronden) juist tot uiteenvallen van secundaire in primaire erosiegevoelige aggregaten. Vooral de gecombineerde werking met organische stof is in die zin funest (CHEPIL en WOODRUFF, 1963), DOLGILEVICH, 1977). Op zandgronden (fijnzandig) is de werking echter gunstiger. De werking daar komt ongeveer overeen met die van silt: vorming aggregaatjes groter dan 1 mm, echter van een grotere stabiliteit (CHEPIL en WOODRUFF, 1963). De hoeveelheden die worden aangewend ter verhoging van de pH zijn over het algemeen te gering om werkelijk invloed te hebben op de struktureigenschappen ten aanzien van winderosie. Op venige bodem leidt toevoeging van kalk bovendien tot versnelde oxidatie van organische stof (WIND, 1979).

F e - e n A l - v e r b i n d i n g e n. In de literatuur wordt naast de term 'clay' soms ook 'physical clay' gebezigd. In het tweede geval wordt daaronder dan tevens vrije silica, aluminium- en ijzer-verbindingen begrepen. Deze verbindingen hebben dezelfde werking als kleimineralen wat betreft verkitten van bodemdeeltjes en verhoging van de weerstand tegen winderosie (DOLGILEVICH, 1977; SHIYATJI e.a., 1972).

Z o u t e n. Zouten (Na, Mg en Ca chloriden) hebben een nadelige invloed op weerstand tegen winderosie (MONNIER, 1965). LYLES en SCHRANDT (1972) vonden dat in combinatie met neerslag, NaCl beter uit de verf kwam dan de beide andere zouten en dan zelfs een positieve uitwerking kon hebben op de bodemstabilisatie.

B o d e m r u w h e i d. Verruwing van het bodemoppervlak veroorzaakt wervelingen in de langsstrijkende wind, verticale verschuiving van het windprofiel en afname van de liftkracht, terwijl de uitstekende elementen een groot deel van de windkracht opnemen (zie fig. 19). Sneeuw en water tonen de minste verruwing 0 tot 3 cm (z_0), een braakliggende grond tot 10 cm. Een grof bewerkt veld biedt dan ook over het algemeen meer weerstand tegen stuiven, tenzij de hoge delen uit zeer erosiegevoelig materiaal bestaan. In dat geval kunnen zij juist als een startpunt voor erosie gelden. Hoewel de lagere terreingedeeltes daarbij als zandvang fungeren voor de doorsaltatie en creep verplaatste bodemdeeltjes, gaat de stoffractie toch verloren.

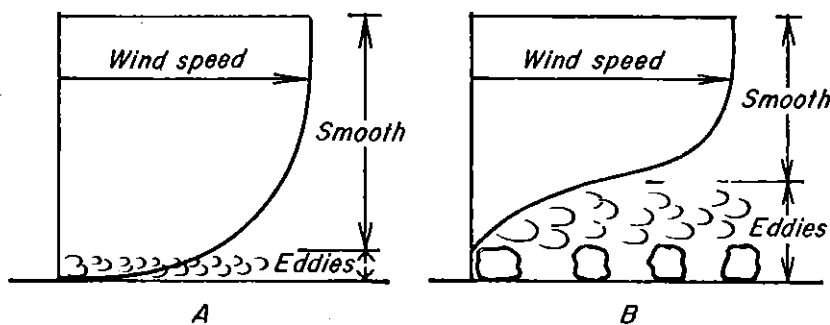


Fig. 19. Windgradienten boven een glad (a) en een ruw oppervlak (b)
bron: HUDSON (1973)

H e l l i n g. De erosiegevoeligheid van de bodem onder invloed van de luchtbewegingen is bepaald bij vlak terrein, maar heeft evenzo geldigheid bij hellend terrein. Enige verandering treedt wel op, voornamelijk in de luchtbewegingen. Volgens CHEPIL e.a. (1964) is er boven golvend terrein met hellingen kleiner dan 1,5% of hellinglengten groter dan 500 m nauwelijks verschil met vlak terrein.

Bij kortere lengten en steilere hellingen in de richting van de wind (fig. 20) (bijvoorbeeld 3%, <100 m en 10%, <250 m) treedt er een verhoging van de gradient op en neemt de schuifsnelheid toe.

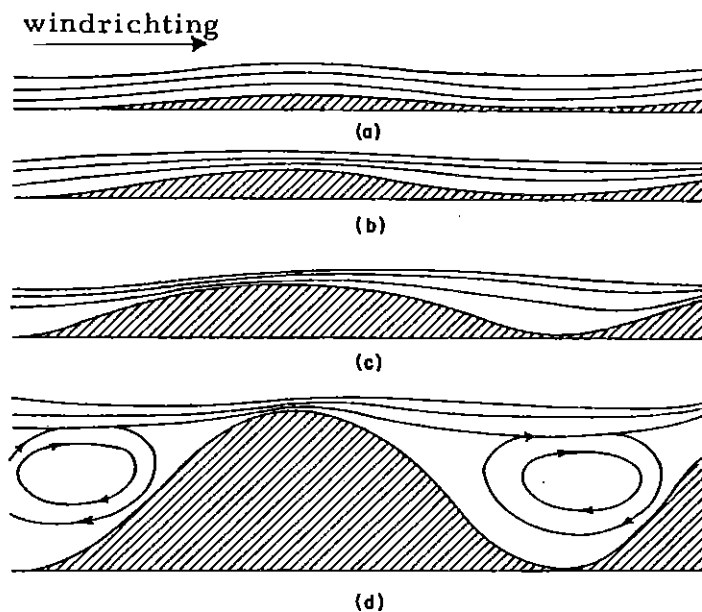


Fig. 20. Lijnen van gelijke windsnelheid boven a) een hoogteverschil van 45 cm op 30 m, b) een heuveltje met een diameter kleiner dan 120 m met 3% helling, c) als b met 6% helling, en d) ruggen met helling >25% (niet op schaal)
 bron: CHEPIL e.a. (1964) naar DROUGHTY

Verruwing door grove bewerking (microreliëf) heeft bij golvend terrein (macro-reliëf) dezelfde positieve uitwerking als op vlak terrein (PASAK, 1970).

3. BEPALING VAN EROSIEGEVOELIGHEID EN EROSIE

Er zijn vele methoden ontwikkeld om winderosie te meten en de erosiegevoeligheid (mate van erosie onder gestandaardiseerde omstandigheden) te bepalen. Deze zijn neergelegd in theoretische en empirische verbanden, gebaseerd op een aantal van de voornoemde

factoren. Werkelijke omvang kan hieruit worden afgeleid, of rechtstreeks worden gemeten.

3.1. Erosiegevoeligheid

De erosiegevoeligheid wordt bepaald door de in de vorige paragraaf behandelde bodemeigenschappen en is afhankelijk van de windsnelheid. Bovendien is erosiegevoeligheid een tijds- en plaatsgebonden grootheid. Tijdens het erosieproces zal de hoedanigheid van het bodemoppervlak veranderen: de ruwheid vermindert of neemt toe, verandering van de verhouding erodeerbaar en niet-erodeerbaar materiaal. De plaatsfactor beïnvloedt de erosiegevoeligheid als volgt: bij toenemende strijklengte neemt ook de hoeveelheid getransporteerd materiaal toe en wordt de aggregaatbrekende werking vergroot, waardoor het gehalte aan transporteerbaar materiaal toeneemt. Bij de bepaling van erosiegevoeligheid worden deze laatste factoren evenwel doorgaans buiten beschouwing gelaten.

PASAK (1970) geeft een multiële regressievergelijking voor de erosiegevoeligheid E , gebaseerd op korrelgrootte, vochtgehalte en windsnelheid en stelde voor eenvoudige bepaling het volgende nomogram samen (fig. 21).

Een nadere experimentele uitwerking geeft hij in de volgende vier figuren (22 a t/m d) voor verschillende textuur en vochtgehalte.

CHEPIL en WOODRUFF (1963) definieerden erosiegevoeligheid als de hoeveelheid erodeerbaar materiaal, welke evenredig is met de vijfde macht van de schuifsneldheid boven een eroderend oppervlak bij een veldlengte van minder dan 10 m:

$$I = a(u'_*)^5 \quad [ML^{-2}] \quad (8)$$

waarin coëfficiënt a (dimensieloos) afhankelijk is van een grote verscheidenheid aan factoren. Daarnaast geven ook zij een aantal vergelijkingen voor de relaties tussen erodeerbaarheid en achtereenvolgens vochtgehalte, lutumgehalte en 'oneffenheid'.

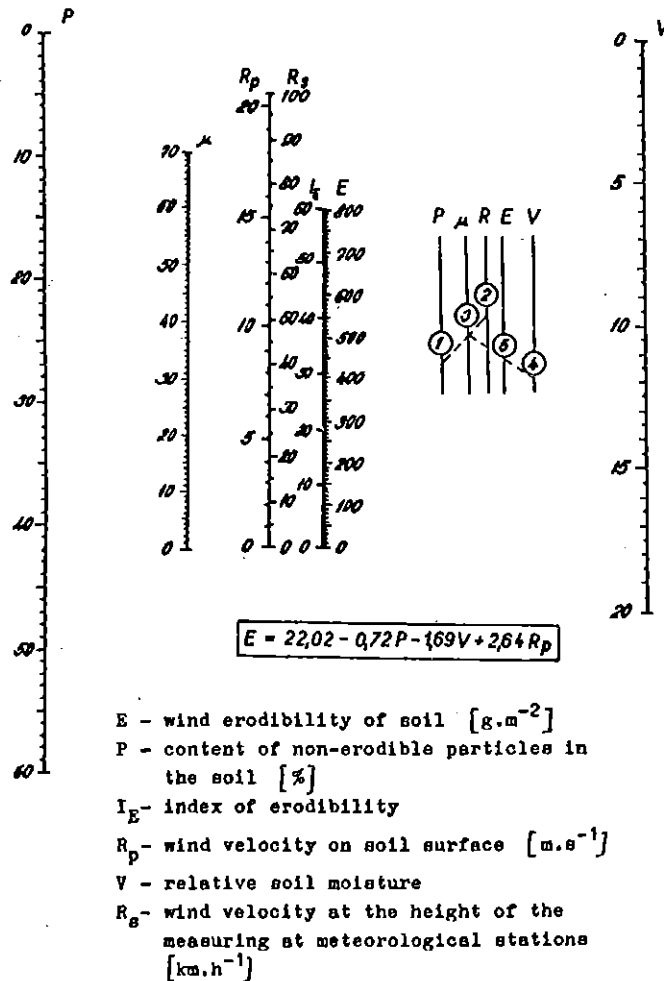


Fig. 21. Nomogram ter bepaling van te verwachten bodemverlies bij winderosie
bron: PASAK (1970)

Om verschillende gronden met elkaar te kunnen vergelijken zonder dat factoren als veldlengte en wijze van meten daarbij een rol spelen, voerden zij de erosiegevoelheidsindex in: de verhouding tussen de hoeveelheid geërodeerd materiaal van een grondoppervlak met geringe strijklengte (<10 m, zoals in windtunnels) en de toelaatbare hoeveelheid, bepaald als de gemiddelde hoeveelheid - onder gelijke omstandigheden - geërodeerd materiaal van een grondoppervlak met 60% deeltjes groter dan $0,84$ mm (zie tabel 2). Op basis daarvan stelden zij een tabel (tabel 3) samen met gegevens van wind-erosiegevoeligheid I voor gedefinieerde omstandigheden in tons/acre/year (zie WOODRUFF en SIDDOWAY, 1965).

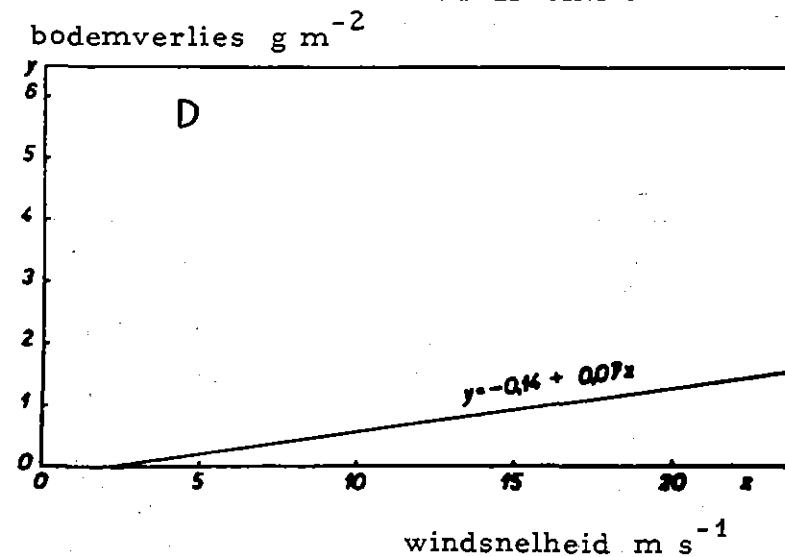
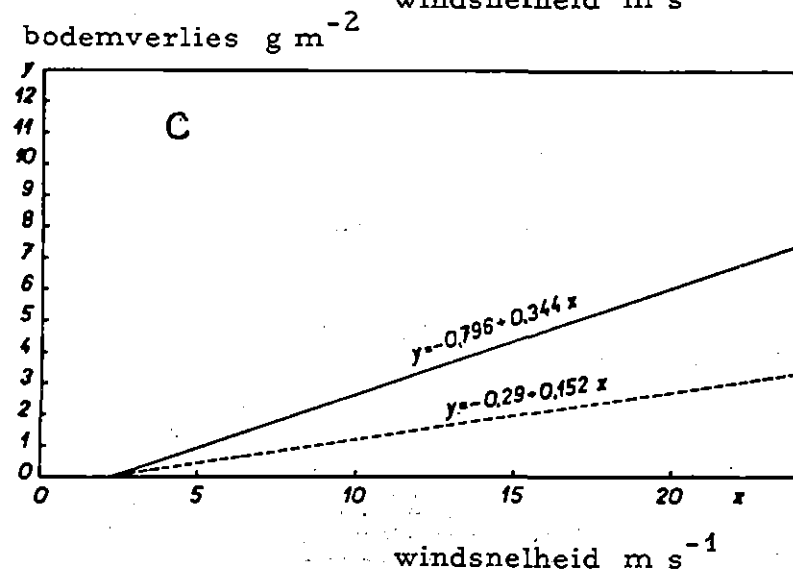
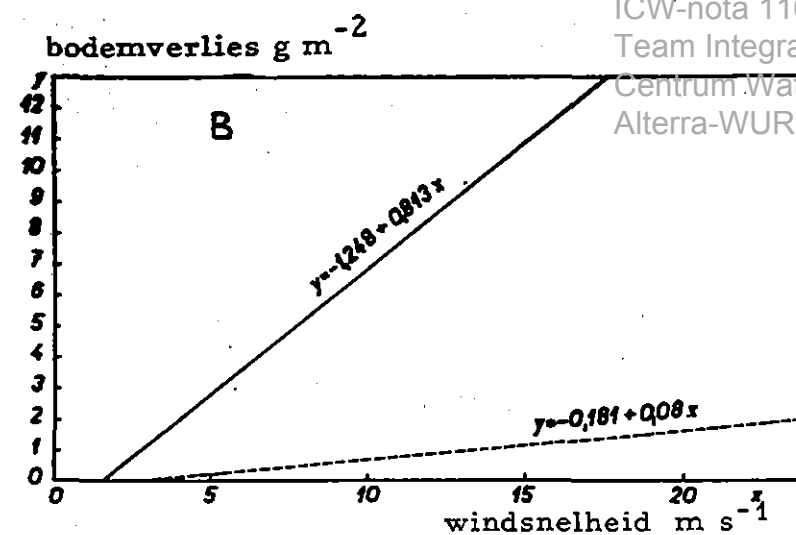
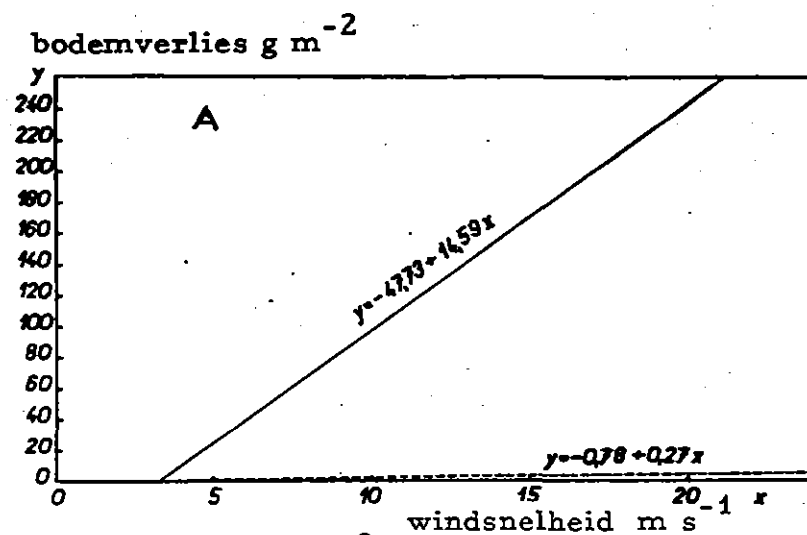


Fig.22 Relatie tussen verplaatste hoeveelheid bodemmateriaal (ms^{-1} op 5 cm hoogte)
voor droge (—) en vochtige (----) grond: a) zandige bodem; b) lemig-zandig;
c) zandig-lemig; d) leemgronden
bron: PASAK (1970)

Tabel 2. Bodemerosiegevoeligheids index I_w , gebaseerd op percentage bodemdeeltjes groter dan 0,84 mm, zoals bepaald via de droge-zeef methode
bron: CHEPIL en WOODRUFF (1959)

Percentage of soil fractions greater than 0.84 mm:		Units									
Tens		9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
9											0.02
8		0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
7		0.12	0.14	0.16	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.5
6		0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
5		1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8
4		3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.9	4.9	5.2	5.6	6.0
3		6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.5	11.0	12.0
2		13	14	15	16	17	18	19	20	21	23
1		25	27	30	33	36	39	43	17	51	55
0		70	80	100	120	150	175	280	450	1000	—

Tabel 3. Bodemerosiegevoeligheid I voor bodems met verschillende gehalten aan deeltjes groter dan 0,84 mm, zoals bepaald met de droge-zeef methode. bron: WOODRUFF en SIDDOWAY (1965)

Percentage of dry soil fractions > 0,84 mm	Units									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
tens	tons/acre									
0	---	310	250	220	195	180	170	160	150	140
10	134	131	128	125	121	117	113	109	106	102
20	99	95	92	90	88	86	83	81	79	76
30	74	72	71	69	67	65	63	62	60	58
40	56	54	52	51	50	48	47	45	43	41
50	38	36	33	31	29	27	25	24	23	22
60	21	20	19	18	17	16	16	15	14	13
70	12	11	10	8	7	6	4	3	3	2
80	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---

* For a fully crusted soil surface, regardless of soil texture, the erodibility I is, on the average, about 1/8 of that shown.

Voor praktische doeleinden ontwikkelden CHEPIL en WOODRUFF (1959) ook de 'windtunnel erosiegevoeligheid' X, welke wordt gedefinieerd als

$$X = 400 \frac{I_w}{(R.V.)^{1,26}} \quad [ML^{-2}] \quad (9)$$

waarin

R = ridge roughness (gemiddelde vore diepte in inches)

V = gewicht aan vegetatieve resten (lb/acre)

HAYES (1972) deelde de grondsoorten in naar textuur en kalkgehalte in groepen op basis van het gehalte aan deeltjes groter dan 0,84 mm en noemde deze 'winderosiegevoeligheids groepen' (zie tabel 4). Deze verschillende indelingen worden in de literatuur over winderosie (met name de Amerikaanse) algemeen gebruikt.

Tabel 4. Beschrijving van winderosiegevoeligheidsgroepen (WEG)

bron: HAYES (1972)

WEG	Predominant soil textural class	Dry soil aggregates > 0.84 mm. percent	Soil erodibility "T", MT/ha/yr
1	Very fine, fine, and medium sands; dune sands.	1	696
2	Loamy sands; loamy fine sands.	10	301
3	Very fine sandy loams; fine sandy loams; sandy loams.	25	193
4	Clays; silty clays; noncalcareous clay loams and silty clay loams with more than 35 percent clay content.	25	192
4L	Calcareous loams and silt loams; calcareous clay loams and silty clay loams with less than 35 percent clay content.	25	193
5	Noncalcareous loams and silty loams with less than 20 percent clay content; sandy clay loams; sandy clay.	40	126
6	Noncalcareous loams and silty loams with more than 20 percent clay content; noncalcareous clay loams with less than 35 percent clay content.	45	108
7	Silts; noncalcareous silty clay loams with less than 35 percent clay content.	50	85

3.2. Omvang van winderosie

Voor de bepaling van de omvang van winderosie zijn vele rekenmethoden ontwikkeld. De meeste empirische formules hebben de functionele vorm $q_s = f(d^a, u_z^b \text{ of } u_*^c)$; zoals: (CHEPIL en WOODRUFF, 1963):

$$Q = a \sqrt{D_e} \frac{\rho}{g} (u_*')^3 \quad (10)$$

Hierin is q het gewicht van de totale hoeveelheid verplaatst materiaal per eenheid van tijd en breedte.

CHEPIL en WOODRUFF relateerden de hoeveelheid in suspensie verplaatst materiaal, aan de zichtbaarheid overdag, die varieert met de hoogte volgens

$$C_2 = \frac{a}{z^b} \quad (\text{zie fig. 23}) \quad (11)$$

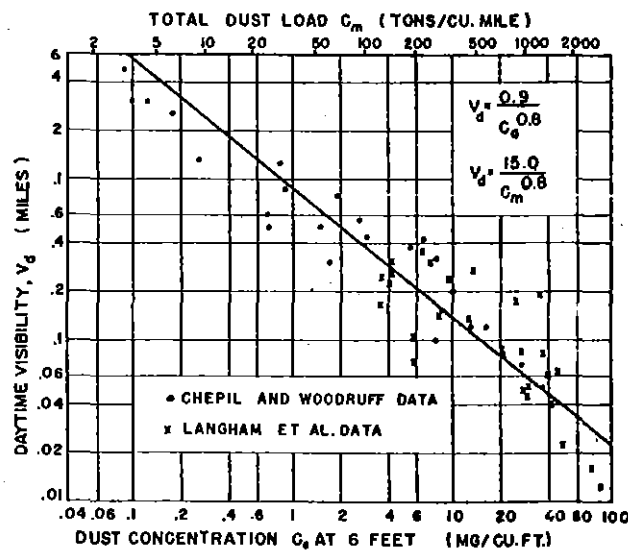


Fig. 23. Verband tussen zichtbaarheid (overdag) en stoflading en -concentratie

bron: CHEPIL en WOODRUFF (1957)

Het omvangrijke werk van CHEPIL e.a. resulteerde onder andere in de 'wind erosion equation', welke een tweeledig doel heeft:

1. het kunnen bepalen van de erosie omvang
2. om te kunnen bepalen wat het effect is van bepaalde maatregelen en hoe omvangrijk deze moeten zijn om de winderosie tot aanvaardbare proporties te reduceren;

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

waarin

- E = potentieel gemiddeld jaarlijks bodemverlies ($M L^{-2} T^{-1}$)
- I = bodemerosiegevoeligheid ($ML^{-2} T^{-1}$), bepaald op basis van het gehalte niet-erodeerbaar materiaal, verkregen na standaard-droog-zeven
- C = lokale winderosie-klimaatsfactor (%), waartoe voor de Verenigde Staten een referentiekaart is vervaardigd, op basis van gemiddelde windsnelheid en gemiddeld vochtgehalte van de toplaag
- K = bodem ruwheids-equivalent (dimensieloos), afhankelijk van de hoogte en onderlinge afstand van kluiten en 'ruggen' en gerelateerd aan een standaard ratio 1 : 4 (hoogte: onderlinge afstand)
- L = equivalente veldlengte (dimensieloos), als de maximale onbeschermd afstand evenwijdig aan de windrichting
- V = equivalente hoeveelheid vegetatieve bedekking, afhankelijk van hoeveelheid materiaal en van aard en situering daarvan

De bepaling geschiedt aan de hand van een reeks monogrammen en tabellen, zoals gegeven door WOODRUFF en SIDDOWAY (1965). FISCHER en SKIDMORE (1970) en SKIDMORE e.a. (1970) beschrijven een Fortran IV programma (WEROS) waarmee de wind erosion equation kan worden opgelost. Voor toepassing buiten Noord-Amerika zullen de factoren I en C opnieuw bepaald moeten worden en in tabellen of monogrammen worden vastgelegd. De methode zoals die in bijlage III is gebruikt zou hiervoor een benadering kunnen zijn.

GILLETTE (1977) formuleert, uitgaande van de parameters van de wind erosion equation, de hoeveelheid eroderend materiaal als de horizontale flux

$$q = 0,16 \frac{LX}{16500} \left(\frac{u^*}{78} \right)^3 \quad (\text{g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}) \quad (12)$$

waarin X de eerder genoemde windtunnel erosiegevoeligheid is, L de veldlengte en waarin de schuifsnelheid is gecorrigeerd voor het vochtgehalte (zie 'water'). Voor eenparige erosie (constante massa stroom) vond hij goede overeenkomst met veldwaarnemingen (correlatie coëfficiënt = 0,84), voor intermitterende erosie was de overeenkomst geringer (r = 0,70). De veldmetingen werden uitgevoerd met behulp van de zogenaamde Bagnoldcatcher*.

Daarnaast ontwikkelde hij een formule voor de bepaling van de verticale flux van deeltjes kleiner dan 0,02 mm:

$$Fa^1 = P_1 C_D U_1^2 \left(\frac{N_2 - N_1}{U_2 - U_1} \right) \quad (13)$$

waarin

Fa^1 = verticale flux van deeltjes ($\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

C_D = sleep-coëfficiënt (PRIESTLY, 1959)

U_1, U_2 = gemiddelde windsnelheid op hoogten 1 en 2

N_1, N_2 = gemiddelde mengingsratio's voor deeltjes op die hoogten

Voor een aantal gronden bepaalde hij vervolgens de verhouding tussen verticale en horizontale flux, waarbij de laatste gedeeld wordt door de hoogte van het opvanginstrument (76 cm), zodat de verhouding een dimensieloze grootheid is. Als nu meteorologische en bodemgegevens bekend zijn kan hiermee een goede schatting worden gegeven van de totale flux zonder dat verticale flux wordt gemeten.

*zie 'meetinstrumenten'

3.3. M e t e n ; m e t h o d e n e n i n s t r u m e n t e n

Er wordt hierbij onderscheid gemaakt naar meting van parameters ter bepaling van winderosie enerzijds en naar mate van erosiegevoeligheid en omvang van winderosie anderszijds.

3.3.1. Meteorologische factoren

De erosieve kracht van de wind wordt gemeten aan snelheid en richting van de wind en is afhankelijk van de ruwheid van de bodem. De windsnelheid (-richting) wordt op verschillende hoogten gemeten. Voor winderosie onderzoek gebeurt dit vaak vlak boven het bodemoppervlak, waarna al dan niet omrekening plaatsvindt naar een of andere standaardhoogte. In de literatuur is hierover weinig eenstemmigheid. Soms wordt de hoogte helemaal weggelaten zodat vermelde resultaten onvergelijkbaar worden. Bij een bekende z_0 en gegeven de windsnelheid op een zekere hoogte kan met behulp van vergelijking (1) een windprofiel worden vastgesteld en de schuifsnelheid worden berekend. Zoals in paragraaf 2.1.1. al werd gesteld, vindt aanpassing van het profiel na verandering van windsnelheid of ruwheid slechts geleidelijk plaats, zodat omrekening niet geheel juist zal zijn. In windtunnels, waar sprake is van een constante, weinig turbulente stroming, zou dat beter opgaan, maar daar spelen weer andere verstoringende invloeden een rol (zij- en bovengrensvlakken).

In Nederland wordt door meteorologische stations gemeten op 10 m hoogte, waarbij de windsnelheid wordt opgegeven in m s^{-1} als gemiddelde over een tijdsperiode. Ook worden piekwaarden opgegeven. Windsnelheidsmetingen worden met tal van instrumenten uitgevoerd, zoals de cup- en vane-anemometers en pilotbuizen (windtunnels) (zie o.a. GRACE, 1977). Bij experimenten in het veld wordt gerekend met gemiddelden per tijdseenheid of voor de duur van de proef. In windtunnels geldt de ingestelde waarde.

Voor de bepaling van (toekomstige) omvang van erosie en de totale erosieve kracht van de wind wordt doorgaans uitgegaan van langjarige gegevens per gebied.

SKIDMORE en WOODRUFF (1968) bepaalden de erosieve kracht van de wind voor bepaalde klimatologische omstandigheden, als de som van het gesommeerde produkt van de derde macht van de gemiddelde windsnelheid en een duurfactor; voor windsnelheden groter dan 5 m s^{-1} :

$$F_T = \sum_{j=0}^{15} \sum_{i=1}^n \bar{u}_{ij}^{-3} f_{ij} \quad (14)$$

waarin

F_T = totaal erosieve kracht van de wind voor een bepaalde plaats in de beschouwde periode

$\bar{u}_{ij}$ = gemiddelde windsnelheid in de i-de snelheidsgroep in richting j

f_i = duurfactor, als percentage van het totaal aantal waarnemingen met richting j de i-de snelheidsgroep

i = 1, n

j = 0, 15; 16 kompasrichtingen

Hiermee bepaalden zij voor meer dan 200 plaatsen in de Verenigde Staten de erosieve windkracht en de meest erosieve windrichting. Toepassing vindt men onder andere bij de bepaling van oriëntatie en onderlinge afstand van barrières. ZINGG (1950) bepaalde de intensiteitsverdeling van de windsnelheid voor een bepaald gebied met behulp van de methode van GUMBEL en POTTER (zie ook CHEPIL en WOODRUFF, 1976). Meestal echter wordt bij de bepaling van op basis van meerjarige gegevens opgestelde frequentieverdelingen, uitgegaan van een combinatie van meteorologische factoren.

De klimaatsfactor C in de Wind Erosion Equation is gebaseerd op de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid, uitgaande van de normale verdeling van atmosferische windsnelheden: een hoog jaarlijks gemiddelde betekent een grotere kans op hoge windsnelheden. Daarnaast is per lokaliteit de neerslag minus de verdamping (P-E index volgens THORNTHWAITE) ingevoerd. Met behulp van deze gegevens en de GUMBEL-POTTER methode bepaalde CHEPIL e.a. (1962) de frequentieverdeling van klimatologische omstandigheden (fig. 24). Bij de frequentieberekening in bijlage III is uitgegaan van dezelfde meteorologische gegevens, maar is een andere methode gevolgd.

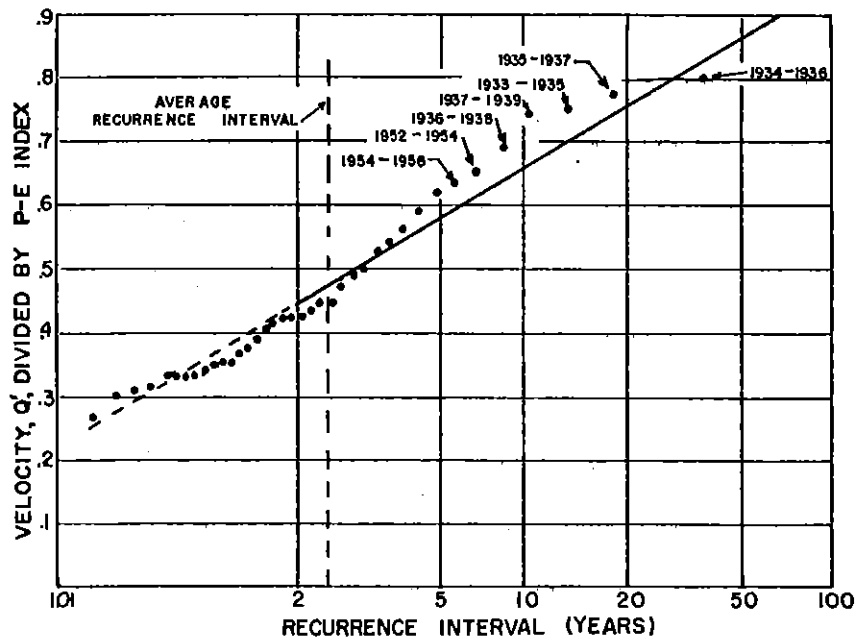


Fig. 24. Intensiteits-frequentie gegevens voor driejaarlijkse gemiddelden van windsnelheid Q^1 (30 cm hoogte) gedeeld door driejaarlijks gemiddelde van P-E index voor een bepaald gebied, over de periode 1920-1960
 bron: CHEPIL e.a. (1962)

3.3.2. Bodemkundige factoren

Zoals uit het voorgaande duidelijk is geworden gaat het daarbij om de korrelgrootteverdeling en de mate en aard van de structuur van de bodem.

Bij het eerste zijn vooral de grenzen 0,08 en 0,8 mm van belang. Afhankelijk van de gedetailleerdheid van een onderzoek kunnen nog verdere onderverdelingen worden gemaakt, waarbij het gehalte aan deeltjes kleiner dan 0,002 mm (lutum, physical clay) de voornaamste is (GILLETTE, 1977; WILSON, 1975). Voor de bepaling van deze gehalten zijn vele methoden ontwikkeld, zoals droge en natte zeefmethoden (zand- en siltfrakties en aggregaatjes), dispersiemethode (lutum). CHEPIL en WOODRUFF (1963) en PASAK (1970) geven vergelijkingen voor erosiegevoeligheid afhankelijk van het kleigehalte.

Bij de structuur van de bodem zijn de overige eerdergenoemde factoren in het geding. Bepaling van het percentage (gewichtsprocenten) van de oppervlakte vastgelegd in deeltjes groter dan 0,84 mm is daarbij het belangrijkste. Daarbij is tevens van belang de fysische en chemische stabiliteit van de aggregaatjes. Vooral onder een bombardement van salterende deeltjes. DOLGILEVICH (1977) geeft als voorbeeld dat aggregaatjes een kracht van 2,2-27N (een massa van 0,2 - 2,7 kg) kunnen weerstaan, maar onder invloed van salterende deeltjes snel uiteenvallen. CHEPIL (1951) bepaalde de mechanische stabiliteit via herhaald droog-zeven door schudden. De relatieve weerstand tegen afslijpen (abrasion) drukte hij uit in een coëfficiënt (coefficient of abrasion) als de hoeveelheid van een aggregaat afgeslepen materiaal onder invloed van een bepaalde hoeveelheid schurende deeltjes, welke met een snelheid van 25 mile/hour (11 m s^{-1}) tegen het aggregaat wordt geblazen (CHEPIL, 1955):

$$a = A_v \left(\frac{25}{u} \right)^2 \quad (15)$$

waarin

a = coëfficiënt of abrasion

A_v = gewicht afgeslepen materiaal

u = windsnelheid in mile/hour

Coëfficiënt a blijkt daarbij omgekeerd evenredig met de via zeven bepaalde mechanische stabiliteit. Ook oplosbaarheid in water van wisselende samenstelling kan worden bepaald als het gaat om de weerstand tegen erosie gedurende een langere periode (zie tabel 5).

Mate en aard van de structuur zijn afhankelijk van het gehalte aan kittende elementen in de bodem:

Lutum (= clay) of het gehalte aan deeltjes kleiner dan 0,002 mm (= physical clay) in gewichtsprocenten;

Humus of organisch stofgehalte in gewichtsprocenten; Bepalingsmethoden zijn onder meer de gloeiverliesmethode (met correcties voor kalk en waterverlies), de natte oxidatiemethode, zoals bijvoorbeeld in Oosterbeek (Laboratorium bedrijfsgrond- en gewasonderzoek) wordt gebruikt en de elementairanalyse (BODEMKUNDE, 1976).

Tabel 5. Relatie tussen waterstabiele structuur en droge grond
 structuur en erodeerbaarheid door wind
 bron: CHEPIL en WOODRUFF (1963) naar CHEPIL

Grondsoort	Aantal proef- veldjes	Waterstabiele fracties		Kluiten 0,84 mm (%)	Hoeveelheid geërodeerd in windtunnel* (kg/ha)
		>0,84 mm (%)	<0,02 mm (%)		
Sand	3	4,8	1,7	3,3	49,8
Loamy sand	12	3,8	3,0	6,9	29,4
Sandy loam	13	3,0	10,0	36,6	5,4
Loam	25	3,2	13,8	44,4	2,2
Silt loam	35	3,0	17,8	48,6	1,9
Clay loam	5	4,5	14,0	43,6	1,5
Silty clay loam	10	5,2	14,4	49,4	1,2
Silty clay	1	3,9	10,8	19,2	3,4
Clay	8	1,9	10,8	20,2	6,7

* $u_* = 61 \text{ cm s}^{-1}$

SIMMONS en DOTZENKO (1974) vonden dat kationenuitwisseling capaciteit (CEC) en het vochtpercentage bij een vochtspanning van 15 bar (verwelkingspunt) een betere maat zijn voor het gehalte aan erosieve deeltjes (bepaald via de droge zeefmethode) en dus voor de erosiegevoeligheid dan het lutum-, silt- of humusgehalte (zie fig. 16 a,b). Met betrekking tot de mechanische stabiliteit bleek CEC een iets betere parameter dan het 15-bar vochtgehalte.

Via chemische analyses kan daarnaast het gehalte van N, CO₂, Ca²⁺, Mg²⁺, beschikbaar P₂O₅- en K₂O-gehalte en de pH, alsmede het gehalte aan zouten (chloriden) worden bepaald.

Tenslotte kunnen pakkingsdichtheid, vorm en ligging van de deeltjes worden bepaald, door middel van belastingsproeven en dergelijke.

Een apart aspect is de bodemruwheid en de hoeveelheid, aard en plaatsing van gewasresten op het veld. Daarbij gaat het hoofdzakelijk

om de absolute hoogte van de obstakels en de onderlinge afstand, alsmede de variatie in hoogte, welke grootheden direct kunnen worden gemeten.

3.3.3. Omvang

Voor directe meting van de hoeveelheid en samenstelling van verstoven materiaal worden verschillende methoden en instrumenten toegepast. Bij veldmetingen, in proeven onder (deels) kunstmatige of natuurlijke omstandigheden wordt vaak de zogenaamde Bagnold-catcher gebruikt. Dit is een rechthoekige opvangbak met een breedte van 1 cm en een hoogte van 76 cm, welke in vakken is onderverdeeld. Hierin wordt op een zekere afstand windwaarts salterend materiaal opgevangen, waarbij bovenin minder en fijner materiaal terecht komt dan onderin. Bepaling van de hoeveelheid stof (materiaal in suspensie) geschiedt onder meer via zichtbaarheidstests (PATTERSON e.a. 1976). GILLETTE (1977) nam tijdens een stofstorm, hoog in de lucht stofmonsters met behulp van een aan een vliegtuig gemonteerd opvanginstrument (zie ook ZENSCHESKY e.a. 1976).

Voor een snelle herkenning van geërodeerde en erosiegevoelige gebieden werden methoden ontwikkeld welke gebruik maken van lucht-fotografie. FRYREAR en WIEGAND (1974) vonden bij opnamen vanuit een vliegtuig betere resultaten met infrarood, dan met kleurenfoto's. Met behulp van een densitometer werden een aantal lijnen op de foto's aangegeven (isodensitometerlijnen) welke vervolgens in het veld werden geanalyseerd op textuur en vegetatieve resten. SEEVERS e.a. (1975) concludeerden na experimenten met beelden vanuit de ERTS-1 satelliet (EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE), dat de beste resultaten werden verkregen met beelden in het zichtbare rood (MSS band 5). In een recente aflevering van het ITC-journaal geeft BERGSMA (1979) een uitgebreide beschrijving van het gebruik van luchtfotografie bij de herkenning van stuifgevoelige gebieden, ingedeeld naar de mate van waarin deze kwaliteit zich in het veld manifesteert.

3.3.4. Windtunnels

Een veel gebruikt instrument bij winderosieonderzoek is de windtunnel. Het principe daarvan is, dat in een geheel of gedeeltelijk afgesloten kokervormige ruimte een luchtstroom met een (bij voorkeur) constante snelheid, turbulentiegraad en luchtvochtigheid kunstmatig wordt opgewekt en in stand gehouden. KNOTTNERUS (1971), DOLGILEVICH (1974), PASAK (1970), SHAH (1962) en vele anderen beschrijven principe, ontwerp en toepassing van diverse windtunnels. KNOTTNERUS heeft bij het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid te Haren (Groningen) de beschikking over een windtunnel met een gesloten circuit zodat de aangezogen lucht een constante temperatuur en luchtvochtigheid heeft, hetgeen de reproduceerbaarheid van onderzoeksresultaten aanzienlijk vergroot. Met een lengte van 20 m is deze tunnel lang genoeg om goed het effect van avalanching te kunnen bestuderen.

Met behulp van windtunnels kunnen vele parameters bij het winderosieproces (kritieke snelheid, schuifsnelheid, windtunnelerodibility) worden bepaald, effecten van maatregelen, bruikbaarheid van bestrijdingsmiddelen en de luchtbewegingen rond obstakels worden onderzocht.

Een belangrijk bezwaar van windtunnel experimenten is het feit dat de resultaten niet zonder meer van toepassing zijn op veldomstandigheden waar temperatuurverschillen en turbulentie een grote rol spelen. Volgens FAN en DISRUD (1977) is bij stroming in het open veld sprake van een regelmatige opeenvolging van windstoten, waardoor de gemeten windsnelheid als gemiddelde over een zekere tijdsperiode, altijd kleiner is dan de werkelijke snelheid. De in windtunnels, met gelijke snelheid uitgevoerde experimenten geven dan ook te lage schattingen van het verlies respectievelijk te hoge waarden van de kritieke windsnelheid, waarbij afwijkingen tot een factor twee voorkomen.

4. DE GEVOLGEN VAN WINDEROSIE

De nadelige gevolgen van winderosie overtreffen die van de meer bekende en meer spectaculaire watererosie. Dat uitbreiding van de woestijn in de Sahel zone mede het gevolg is van winderosie is

nauwelijks bekend. Men herinnert zich nog de grote stofstormen in het midden van de jaren dertig in de Verenigde Staten (Dust Bowl), maar dat de schade aldaar, veroorzaakt door stuiven en stofstormen in de zeventiger jaren die van toen overtreft realiseren zich maar weinigen. In deel I is gewezen op de omvang van de schade in het gebied van de Veenkoloniën.

Naast het ontstaan van omvangrijke stofwolken in woestijngebieden, vindt het grootste deel van de schadelijke winderosie plaats in door mensen bewoonde en in gebruik genomen gebieden. Oorzaken zijn meestal de gebruikte landbouwsystemen, waar monocultures en uitputting van de grond de bodem voor lange periodes aaneen onbedekt laten. Overbeweiding in meer natuurlijke gebieden heeft hetzelfde effect. Onder deze omstandigheden leidt een opeenvolging van enkele droge jaren vooral op de lichtere gronden tot catastrofale winderosie. Een uitgebreide opsomming van gevaar en omvang vindt men onder andere bij ECKHOLM (1976), DE VREEDE (1977), KIMBERLIN e.a. (1977), KOVDA (1977), FAO (1960) en MIEDEMA (1950).

De gevolgen van winderosie zijn in drie categorieën in te delen:

- A. V e r l i e s a a n o p p e r v l a k t e m a t e r i a a l, hetgeen op die plek verarming betekent; de landbouwkundige gebruikswaarde van de grond loopt terug. De erosiegevoeligheid van de bodem neemt toe (verlaging van het gehalte aan kittende bestanddelen), soms af (relatieve toename van het gehalte aan niet erodeerbare deeltjes) en deze kwaliteit breidt zich uit over een grotere oppervlakte. Diverse auteurs beschrijven de verlaging van de oppervlakte en verarming van de grond door winderosie. BORSY (1975) vermeldt het wegstuiven van een laag tot 30 cm dikte bij een tien uur durende zandstorm in Hongarije. AHMAN (1975) rapporteert soortgelijke resultaten in de Zweedse Vombvallei, waar uiteindelijk een grofzandige en stenige oppervlakte resteert. Met het oppervlaktemateriaal gaat voornamelijk de vruchtbare stoffractie verloren, wat leidt tot structuurverval, achteruitgang van de biologische activiteit en vermindering van het vochtbindend vermogen. Een gram humus bindt ongeveer twee gram water, een gram lutum, een gram vocht en een gram zand ongeveer 0,2 gram (BODEMKUNDE, 1976). WIND (1979) berekende dat, in het geval van de Veenkoloniën,

het verlies van 1 cm veen de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht met 4 mm vermindert. In tijden van watertekort komt dat neer op een schade van circa f 40,-- per hectare aardappelen. LYLES (1977) relateert de reductie in gewasopbrengst aan het bodemverlies. Hij maakt daarbij gebruik van de Wind Erosion Equation om het gemiddeld jaarlijks bodemverlies te bepalen. Voor WEG-bodems 1, 2 en 3 (zandgronden, zie par. 3.1) komt hij tot reducties van respectievelijk 6, 2 en 1 procent voor tarwe (gemiddelde opbrengst circa 2000 kg/ha) en 7, 2, 3 en 0,8% voor sorghum (circa 3000 kg/ha).

Meer directe gevolgen zijn het wegstuiven van organische en anorganische meststoffen, zaaizaad, en bestrijdingsmiddelen, alsmede het blootstuiven van grotere zaden, knol- en bolgewassen en wortels van jonge gewassen. Er moet dan opnieuw ingezaaid worden, voorzover daartoe de mogelijkheid aanwezig is, hetgeen doorgaans leidt tot lagere opbrengst (zie ook deel I). Hoewel niet beperkt tot winderosiegevoelige gebieden vindt in versterkte mate verspreiding van onkruidzaden, ziekten en dergelijke plaats.

B. S c h a d e e n o n g e m a k t i j d e n s t r a n s p o r t van bodemmateriaal, zoals het kapotschuren van staandgewas, bloot gestoven wortels en zaden en de overlast voor mens en dier (o.a. KIMBERLIN e.a., 1977).

FRYREAR en DOWNES verrichtten veel onderzoek naar de invloed van abrasie op de overlevingskans en gewasopbrengst. FRYREAR (1971) betrok tevens bodemvochtgehalte in zijn onderzoekingen en vond, dat de gevolgen van abrasie afhankelijk waren van vochttoestand en ouderdom van de plantjes. FRYREAR en DOWNES (1975) formuleerden de totale kinetische energie (TKe) die een gewas ondervindt als:

$$TKe = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \cdot M V^2 T A^{-1} \quad (6)$$

waarin

TKe = totale kinetische energie (I)

M = bodemflux (uitgaande van fluxvergelijking (12))
 (g cm⁻¹ . s⁻¹)

V = vrije stroomsnelheid minus drempelsnelheid (cm s⁻¹)

T = 'zandstraal'-tijd (minuten)

A = plantouderdom (minuten van opkomst tot experiment tijdstip)

en vonden een hoge correlatie tussen deze waarde en de procentuele overlevingskans. Zes dagen oude bonen doorstonden een veel hogere bodemflux dan evenoude peperplantjes. Belangrijke factoren bleken hierbij bodemruwheid (R) en hoeveelheid vegetatieve resten (V). Een gecombineerde RV waarde van $2500 \text{ kg cm ha}^{-1}$ bleek de bodemflux afdoende te reduceren. DOWNES e.a. (1977) onderzochten 6 verschillende gewassen op de gevolgen van winderosie (kool, peen, uit, peper, erwt en komkommer). Zij vonden dat overlevingskans en groei afnamen bij toenemende TKe. Hetzelfde geldt voor de uiteindelijke opbrengsten behalve bij erwten en komkommers. Bij erwten werd zelfs een positieve correlatie gevonden tussen opbrengst en TKe.

Stuiven brengt grote overlast aan mens en dier. Vlees en melkopbrengsten worden nadelig beïnvloed door herhaald stuiven (F.A.O., 1960). De mens wordt gehinderd door vermindering van het zicht, ademhalingsproblemen (stof), schade aan werktuigen en gebouwen, terwijl stof op grote hoogte dagenlang sterk luchtvervuilend werkt (lichtonderschepping, 'zure' regen e.d.).

C. S c h a d e d o o r s e d i m e n t a t i e v a n b o d e m - m a t e r i a a l.

Het verloren gaan van het vruchtbaarste deel van de bodem betekent, dat slechts een fractie elders weer als bodemverrijker terechtkomt (lössgebieden). Het grootste deel echter zet zich af op allerlei plaatsen waar het overlast bezorgt (gebouwen) en vervuiling betekent (water). Op minder grote afstand bedekt salterend zand en ander bodemmateriaal andere percelen met een onvruchtbare bodemlaag, worden zaad en opkomend gewas bedolven, stuiven sloten vol en wegen onder. Ernstige stagnatie in transportverbindingen kunnen hiervan het gevolg zijn.

Op zeer grote schaal leidt winderosie tot uitbreiding van woestijngebieden. Door stuiven verarmt het ene gebied en door onderstuiven ook het naastliggende; een onomkeerbaar, voortschrijdend proces.

5. BESTRIJDING VAN WINDEROSIE

Windbeschutting en bescherming tegen winderosie zijn reeds lang bekend. Vooral de bescherming van mens en dier tegen de directe kracht van de wind door middel van muren, hagen en windsingels wordt al eeuwen toegepast (VAN EIMERN, 1964; JOACHIM, 1961). Omvangrijke literatuur over dit onderwerp is even oud als die over het winderosieproces, waarbij het opvalt dat er op dit gebied de laatste 40 jaar geen wezenlijk nieuwe ontwikkelingen zijn. Dat wil zeggen dat men vrijwel vanaf het begin bekend was met de diverse mogelijkheden om het gevaar en de gevolgen van winderosie te bestrijden. Het gevolg is dat onderzoek zich richt op verfijning van de kennis omtrent de effecten van diverse maatregelen, hetgeen steeds weer nieuwe twijfel brengt. Ging men er aanvankelijk vanuit dat windsingels positieve effecten hebben ten aanzien van de gewas-opbrengst en plaatste men vraagtekens bij de bodembeschermende functie, later vertrouwde men meer op het positieve effect wat betreft het laatste, maar was men minder positief over de neveneffecten. De een bejubelt het gebruik van windsingels (SHAH, 1962) de ander moet er niet zoveel van hebben (FOTH, 1978).

Naast verder gedegen onderzoek op deze gebieden (FRYREAR en LYLES, 1977) moet de aandacht zich veel meer richten op effectuering van maatregelen. Met name, wat betreft het treffen van een samenhangend complex van maatregelen, waarbij een integrale aanpak in het kader van agrarische- en landinrichtingsprojecten uitgangspunt zou moeten zijn. Specifieke grondgebruiksvormen in onderontwikkelde gebieden liggen dieper geworteld, dan dat er sprake zou zijn van 'slechts verkeerde boerenkennis'. Overbeweiding is een van de bekende achterliggende problemen. Maar ook de gematigde klimaatstreken van de ontwikkelde wereld kent soortgelijke problemen. Ook daar ligt en lag het niet altijd aan gebrek aan kennis van boer en gebruiker, maar aan het gebrek aan politieke wil en het ontbreken van de noodzakelijke voorwaarden om bescherming ter hand te nemen.

Ter bestrijding van winderosie kunnen verschillende maatregelen worden genomen, die grofweg zijn in te delen naar maatregelen die:

- de windsnelheid aan en tot een zekere hoogte boven het oppervlak reduceren
- de erosiegevoeligheid van de grond zelf verminderen door verhoging van de samenhang tussen de bodemdeeltjes, of door bedekken van de toplaag.

Vele maatregelen zoals gras en bepaalde vormen van groundbewerking geven bescherming op beide manieren.

Een aantal handboeken geven korte overzichtelijke informatie over toe te passen maatregelen zoals FOTH (1978), SCHWAB e.a. (1971), F.A.O. (1960), LUMKES en TE VELDE (1973) en KUIPER (1978).

5.1. Remmen van de windsnelheid

Elke vorm van verruwing aan het bodemoppervlak betekent verhoging van de verticale moment-uitwisseling in de onderste stromingslagen en daardoor vertraging van de gemiddelde windsnelheid vlak boven de grond (WARTENA, 1968). Een bodemoppervlak dat voor meer dan 50% (ZHIGAILOV, 1972) bestaat uit niet erodeerbare elementen is om die reden ongevoelig voor winderosie. CHEPIL en WOODRUFF (1963) gebruiken hiervoor de 'surface barrier ratio' D_s/H welke varieert van 4 tot 20 afhankelijk van de schuifsnellheid en erosiegevoeligheid van de bodem. Het geeft de verhouding aan tussen onderlinge afstand en hoogte van barrières. LYLES e.a. (1974) concludeerden uit wind-tunnelproeven dat bij uniforme spreiding van niet-erodeerbare deeltjes (b.v. gewasresten) de onderlinge afstand groter kan zijn dan voorheen verondersteld werd.

Ook op macroniveau hebben allerlei vormen van obstakels invloed op het stromingsprofiel van de wind. Een belangrijk verschil tussen hoge (doorgaans verspreide) obstakels als bomen, struiken en gebouwen en lage (doorgaans dicht opeen) obstakels als planten, plantenresten en ploegvoren, is, dat het in het geval van lage obstakels gaat om verplaatsing van het nulvlak naar een zekere hoogte boven de grond, terwijl het stromingsprofiel daarboven nauwelijks verandering ondergaat. Bij hoge barrières wordt de gemiddelde windsnelheid vlak boven het grondoppervlak wel gereduceerd, maar is niet gelijk aan nul. Bij lage barrières, die verplaatsing van z_0 teweegbrengen (z_d)

is de erosie geëlimineerd, want de hoogte van z_d is onafhankelijk van de windsnelheid. Bij hoge barrières is het stuifgevaar verkleind, maar niet weggenomen.

Een hoge barrière in de vorm van een bos heeft wel verplaatsing van het nulvlak tot gevolg (net als gewas) maar een dergelijke bodem-beschermende maatregel wordt hier verder niet in beschouwing genomen. Enige voorzichtigheid ten aanzien van het toepassen van windtunnel resultaten met lage barrières op de veldsituatie met metershoge obstakels lijkt echter op zijn plaats.

5.1.1. Grondbewerking/stoppelbewerking

De meeste vormen van grondbewerking ter bestrijding van het stuifgevaar gaan samen met het op het veld achterlaten van planten-resten, staand of liggend, in rijen of verspreid. Daardoor is het effect van aangepaste grondbewerkingstechnieken meestal tweërlei: windremming en vastleggen van de bodemdeeltjes. HOYLE en YAMADA (1975) beschrijven een wijze van grondbewerken op vochtige kleigrond, resulterend in de vorming van een hoog percentage (+ 70%) stabiele aggregaatjes (0,5 - 3 mm) met een uitstekende ruimtelijke spreiding ('aggresizing'). Deze aggregaatjes bleven het hele seizoen intact, verminderden de evaporatie en verhoogden de bodemtemperatuur. Op deze bijkomende zaken wordt ook ingegaan door ALLMARAS e.a. (1977) en in een paper van ARS (1977). Hieruit blijkt onder meer, dat de water- en warmtebegeleiding in fijn bewerkte grond groter is, dat geploegde bovengrond sneller verdampt, maar daarna geen vocht meer aan de ondergrond onttrekt, dat een hoog gehalte aan oogstresten meestal leidt tot lagere bodemtemperatuur (gemiddeld) en grotere temperatuursverschillen door toegenomen stralingsadsorptie. Oogstresten kunnen aanleiding geven tot verlaagde opbrengst door het naderhand vrijkomen van phytotoxische elementen en productie van onder andere ethyleen, wat leidt tot groeivertraging. Korstvorming aan de oppervlakte heeft vertraagde gasuitwisseling tot gevolg, hetgeen bijvoorbeeld bij suikerbiet en katoen tot merkbare verliezen leidt.

MASSOUD (1973) stelt dat het achterlaten van gewasresten de verdamping van de bodem doet afnemen, de dagelijkse temperatuurs-

amplitude juist verkleint en het winderosiegevaar vermindert. Hierbij zijn hoogte en variatie in hoogte (ruwheid) belangrijk. SINHA (1970) vond dat stoppellengte van 30 cm significant beter is dan 15 cm, maar dat beide voldoende bescherming bieden. Bij de verbouw van suikerbieten in erosiegevoelige zandgrond bleek de combinatie van 'rotary-strip' grondbewerking, met een grote hoeveelheid oogstresten goede resultaten te geven (SIMMONS en DITZENKO, 1975). VOORHEES e.a. (1979) noemt 'wheel-trackplanting' als een goede methode om winderosie te bestrijden. Hierbij wordt in één gang gezaaid (in de gewasresten wordt een smalle sleuf getrokken, waarin de zaadjes worden gedeponneerd), wordt de grond aangedrukt (betere vochtnalevering en vorming van niet-erodeerbare aggregaatjes) en wordt vorevorming (verruwing) bewerkstelligd. Aandrukken van de grond geeft weliswaar betere vochtnalevering en daardoor een grotere binding, maar zal doorgaans samengaan met een minder ruwe bodem, waardoor de schuifsnelheid groter is. Dit heeft dan ook alleen maar zin in combinatie met gewasresten, die de verdamping tegengaan en de windkracht opnemen. FRYREAR en KOSHI (1971) vatten de resultaten van onderzoek van zichzelf en anderen samen in onderstaande figuren (25 en 26), waarin de relatie wordt gegeven, welke bestaat tussen mulch en bewerkingsbehandelingen en het potentiële bodemverlies en de evaporatie. Het belangrijkste oogmerk is echter vertragen van de windsnelheid door het produceren van grote kluiten, vorevorming en bij voorkeur staande positie en uniforme spreiding van plantenresten. In zandgronden kan bodemverruwing door kluiten en ruggen echter leiden tot versnelde erosie. De hogere schuifsnelheid boven de uitstekende, erosiegevoelige delen leidt tot een vervroegde start van het stuiven. Wel zal dan het zandvang-effect escalatie van de erosie een tijdlang verhinderen, totdat die laagten opgevuld zijn (CHEPIL en WOODRUFF, 1963). BISAL en FERGUSON (1970) bepaalden op basis van windtunnelexperimenten de relatie tussen kritieke windsnelheid en hoeveelheid tarwestoppel ($\pm$ 15 cm hoog) en percentage aggregaatjes groter dan 1,0 mm. Eerder hadden SIDDOWAY e.a. (1965) dergelijke relaties opgesteld, waarbij tevens de positie van de oogstresten in het veld, in beschouwing was genomen.

290

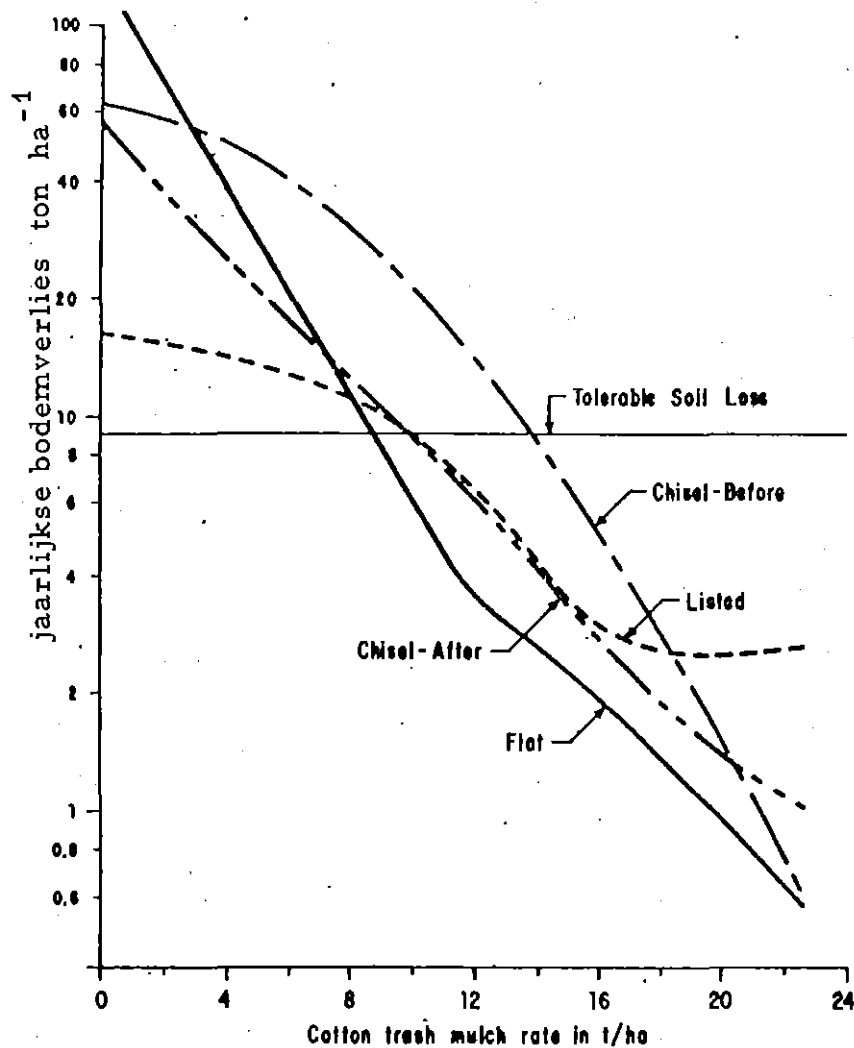


Fig. 25. Verband tussen jaarlijks bodemverlies en hoeveelheid katoenafval-mulch afhankelijk van bewerkingshandelingen
bron: FRYREAR en KOSHI (1971)

LYLES en ALLISON (1976) geven een regressievergelijking waarmee de beschermende werking van staande gewasresten en niet-erodeerbare aggregaten voorspeld kan worden. Daarin wordt de verhouding van de schuifsnelheid, waarbij de bodem zich stabiliseert en de kritieke schuifsnelheid (= kritieke schuifsnelheid-ratio) eveneens gerelateerd aan hoeveelheid, spreiding en hoogte van gewasresten en het gehalte aan niet-erodeerbare aggregaten (>1,0 mm). Hoe hoger de ratio, des te beter is de bescherming. BISAL (1968) vond een S-vormig verband

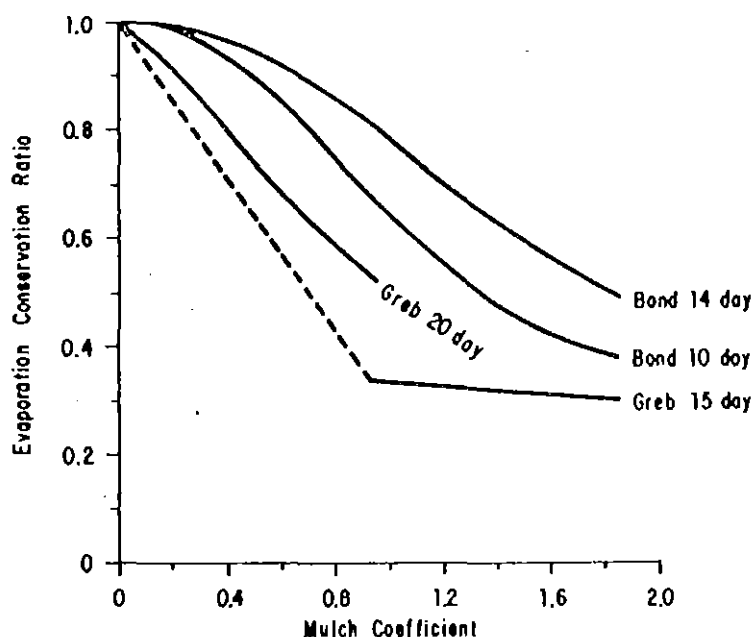


Fig. 26. Accumulatieve evaporatie afhankelijk van mulch hoeveelheid op een fijn-zandige leemgrond (Bond) en een silt-leemgrond (Greb). Evaporatie conserveringsratio is de accumulatieve evaporatie van een bedekte gedeeld door die van een onbedekte grond. Mulch-coëfficiënt is gewicht van de mulch gedeeld door het gewicht benodigd voor 100% bescherming
 bron: FRYREAR en KOSHI (1971)

tussen hoeveelheid staande oogstresten en bodemverlies. Aanvankelijk weinig afname, daarna een snelle afname en tenslotte vrijwel geen stuiven bij een hoeveelheid van 1200 kg ha^{-1} ($u = 5,4 \text{ ms}^{-1}$) tot 7200 kg ha^{-1} ($u = 8,5 \text{ ms}^{-1}$). MEIER (1975) verkreeg op zandgronden goede resultaten met het inrijden van relatief geringe hoeveelheden stro ($500\text{--}600 \text{ kg ha}^{-1}$) in rijen loodrecht op de overheersende windrichting. Een rij stro (15–30 cm hoog) op drie rijen suikerbieten bleek afdoende, waarbij een productie van 2 à 3 hectaren per dag haalbaar bleek. FENSTER en WICKS (1977) beschrijven diverse vormen van grond- en stoppelbewerking, waarbij een ruwer oppervlak wordt verkregen en waarbij de stoppel blijft staan (de hoeveelheid varieert van 2000 tot 7000 kg ha^{-1}). De bewerkingshandelingen worden met verschillende werktuigen uitgevoerd, afhankelijk van hoeveelheid en

aard van de gewasresten, de grond en soort en hoeveelheid onkruid. In veel gevallen zullen deze systemen van minimale grondbewerking een verhoogd gebruik van chemische bestrijdingsmiddelen noodzakelijk maken (ecofallow). Daarnaast gaan zij in op aspecten van het zaaien, de vergrote kans op ziekten (voetrot, schimmels e.d.), wijziging in de insectenpopulatie en de toename van wild (vogels, muizen enz.) welke samengaan met veel oogstresten en weinig menselijke activiteit. Uitgebreide beschrijving van mogelijke vormen van minimum-, zero-, stubble-, emergency tillage vindt men onder andere in BENNETT e.a. (1977), F.A.O. (1960) en WOODRUFF e.a. (1966, 1972). ALLEN e.a. (1977) onderzochten de bijdrage van de landbouw aan de besparing van het energieverbruik door verminderde bewerkingshandelingen en concludeerden, dat deze gering is (1 à 5% van het totaal) en dat daaraan geen sterk argument voor minimum grondbewerking ontleend kan worden.

5.1.2. Gewasbedekking

De beste bescherming tegen winderosie is continue vegetatie (zoals gras, waarop hier niet verder wordt ingegaan) of in ieder geval zoveel mogelijk gedurende de stuifgevaarlijke perioden. Gewasbedekking remt de wind en verbetert de bodemstructuur. Meestal echter zal een continue bedekking via een bepaald vruchtwisselingsysteem niet haalbaar zijn. In droge gebieden zal vaak niet meer dan één gewas per jaar mogelijk zijn, zodat slechts gedurende een korte periode een afdoende vegetatieve bedekking aanwezig is. Het achterlaten van een lange stoppel en zaaien of poten in mulch en stoppelveld is dan een noodzakelijke aanvulling. Tussengewassen worden vaak niet toegepast vanwege het gebruik van water en voedingsstoffen door deze planten, hetgeen ten koste gaat van het hoofdgewas. Dat geldt echter niet in alle gevallen. Gewasbedekking zal vooral in hellende gebieden zorgen voor een grotere waterconservering naast verminderde evaporatie. Leguminozen heffen het bezwaar van gebruik van voedingsstoffen op en maken beperkte beweiding mogelijk. Bij wind- en watererosie gaan ook water en voedingsstoffen verloren, terwijl daarnaast directe schade aan het hoofdgewas kan worden toegebracht! Naast de eerder genoemde bezwaren spelen vaak ook het ongemak bij de bewerkingshandelingen en het probleem van de onkruidbestrijding

in een tussengewas, een grote rol.

FORNSTROM en BOEHNKE (1976) onderzochten de toepassing van gerst als tussengewas bij suikerbieten, waarbij zij niet tot onverdeeld gunstige resultaten kwamen. Het beste bleek zaaien van de gerst tussen de suikerbieten, hetgeen de erosie aanzienlijk verminderde en zelfs tot opbrengstverhoging leidde. In de periode voor het opkomen van beide gewassen is het stuifgevaar echter dan levensgroot.

SCOTT e.a. (1976) deden proeven met witte lupine, rogge en tarwe als tussengewas bij katoen en soja. De bodembedekkers werden in april gehakseld en met de schijveneg ingewerkt, terwijl er ruggen werden gevormd. In een extra experiment werd pulp aan de bovengrond toegevoegd terwijl de katoenvelden, behalve die met Lupine, extra stikstof kregen. De hoofdgewassen werden begin mei uitgezet. Katoen met lupine gaf de laagste opbrengst; soja productie was het hoogst na toepassing van pulp. LUMKES en TE VELDE (1973) en SHORT (1971) deden proeven met winterrogge respectievelijk gele mosterd als tussengewas. Over het algemeen werden goede resultaten geboekt, waarbij LUMKES en TE VELDE de voorkeur geven aan winterrogge voor de Nederlandse situatie (met name bij aardappelen, bieten en mais). Evenals een grote hoeveelheid oogstresten heeft ook de verbouw van een tussengewas invloed op een aantal processen in en nabij de oppervlakte: verminderde evaporatie, verhoogde transpiratie, CO_2 inwisseling, temperatuurschommelingen en dergelijke worden onder andere in de bio-meteorologie bestudeerd (STURROCK, 1975; SHAW, 1977; SCHRÖDER en SCHWERTFEGER, 1979; GRACE, 1977). TOOGOOD (1979) vond onder gerst een lagere bodemtemperatuur tot april (-1°C), daarna een hogere ($+1^\circ\text{C}$). Bij breedwerpig gezaaide winterrogge na aardappelen werd in zandgrond tijdens winters met weinig (nacht-)vorst veel last van aardappelopslag ondervonden. In rijen gezaaide winterrogge had het bezwaar van onvoldoende bescherming bij variërende windrichting. Zaaien in een kruisverband van rijen op een afstand van 30 à 40 cm ondervangt beide problemen (KNOTTNERUS, 1980).

Een andere methode van gewasbescherming is het systeem van strokenbouw. Loodrecht op de windrichting worden op regelmatige

afstand evenwijdige stroken van een gewas uitgezaaid, waardoor de tussenliggende stroken worden beschermd. Het systeem varieert van een combinatie van gewassen die elkaar afwisselen in stroken van gelijke omvang tot barrière-achtige smalle stroken van slechts enkele rijen breed (vergelijk ingereden stro) afgewisseld met bredere stroken waar het het hoofdgewas wordt verbouwd. Bij strokenbouw wordt stuiven niet voorkomen. Door de verruwing wordt weliswaar de windsnelheid geremd en zijn bovendien de bedekte delen beschermd, maar het belangrijkste is het zandvang-effect. Door de korte afstand waarover de wind vat heeft op het onbeschermd bodemoppervlak wordt avalanching voorkomen, zodat de erosie een fractie is van die bij een onbeschermd veld. HAGEN e.a. (1972) onderzochten de trapping-efficiency (TE) van gewasstroken, als het percentage van de hoeveelheid passerende bodemdeeltjes welke wordt vastgelegd. TE bleek afhankelijk van hoogte en breedte van de barrière en van de windsnelheid. Zij vonden dat een 2-rijige strook de hoogste waarde voor TE te zien gaf. Met behulp van de WEE* kan de optimale afstand worden gevonden, welke echter reductie behoeft om teveel bodembeweging tegen te gaan (zie ook fig. 27). Voordelen van strokenbouw zijn een aanzienlijke reductie

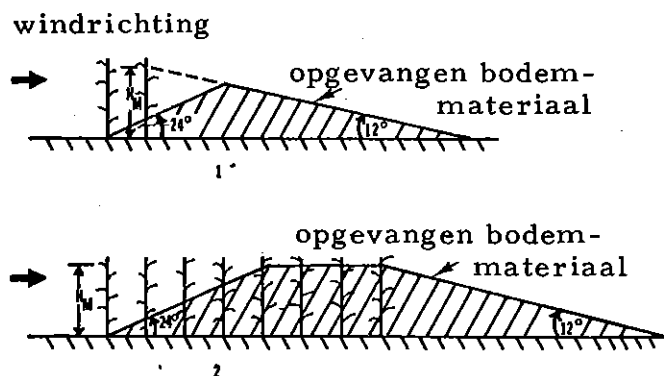


Fig. 27. Volume van opgevangen bodemmateriaal bij verschillende barrière breedte
 bron: HAGEN e.a. (1972)

*Wind Erosion Equation

van de winderosie, het hoofdgewas (of bij gelijke stroken beide gewassen) kan op een vrij veld worden gezaaid, sneeuwvang en bodemvastlegging vergroten de waterconservering. Nadelen zijn onder andere een beperkte werking als er minder sprake is van een overheersende windrichting, de bewerkelijkheid, onkruid- en ziektebestrijding aan de randen van de stroken (zie o.a. FAO, 1960). Op de overgang van strokenbouw en windsingels en kunstmatige schermen vinden we de toepassing van lange grassen (olifantsgras, *Agropyron elongatum*) als smalle schermen op relatief grote onderlinge afstand. BLACK en SIDDOWAY (1971) hanteerden afstanden van 10 en 20 m en vonden aanzienlijke verlaging van de windsnelheid. In het heggenlandschap van de Rhône vallei blijken *Arundograssbarrières* op onderlinge afstand van 20 - 100 meter een goede vervanging van heggen bij de bescherming van bodem en gewas tegen de destructieve kracht van de mistral (GADE, 1978).

5.1.3. Windschermen

Windschermen zijn er in vele vormen. Van smalle kunstmatige schermen (gras, plastic, latten e.d.) of een enkele bomenrij (fruitteelt) tot brede bosstroken. Over dit onderwerp bestaat zeer uitgebreide literatuur. Niet alleen uit het oogpunt van winderosiebestrijding, maar tevens met het oog op beschutting van mens, dier en plant is er zeer veel onderzoek naar verricht. Algemeen gesteld is er in de literatuur overeenstemming met betrekking tot de windremmende werking van schermen: enige vermindering van de windsnelheid aan de windzijde (tot 30%) en een aanzienlijke vermindering vlak achter het scherm, terwijl de invloed nog op grote afstand lijwaarts merkbaar is. Een en ander afhankelijk van de windrichting, de hoogte, de doorlatendheid en (in mindere mate) de vorm van het scherm. Hoe hoger het scherm des te verder strekt de invloed zich uit. Optimale windbeschermende werking wordt verkregen met een smal, gelijkmatig doorlatend (40-50%) scherm. Bij bredere schermen en afnemende doorlatendheid herneemt het windsnelheidsprofiel, sneller zijn oude vorm, zij het met een lagere gemiddelde snelheid (WARTENA, 1968). De afname van de windsnelheid is bij windsnelheden groter dan $1,5 \text{ m s}^{-1}$ onafhankelijk van de vrije windsnelheid (VAN EIMERN, 1964, SKIDMORE en

HAGEN, 1977). Bij windrichtingen afwijkend van de normaal neemt de beschuttende werking af totdat bij een hoek van minder dan 20 graden de beschermende werking nihil is en er zelfs verhoogde windsnelheden kunnen voorkomen. Bij toepassing van meerdere schermen achter elkaar werd bij een onderlinge afstand van 10 tot 20 maal de hoogte wèl en bij grotere afstanden geen cumulatief effect waargenomen. Per scherm neemt daarbij de windremmende werking af, terwijl door de grotere (macro) ruwheid de windsnelheid sneller zijn oorspronkelijk profiel herneemt. Ook de lengte van schermen is belangrijk, daar aan de uiteinden (alsook bij gaten en doorsnijdingen) verhoogde windsnelheden voorkomen (fig. 28 t/m 32). In de hierna volgende figuren is een en ander grafisch en visueel weergegeven. Deze zijn ontleend aan de rijke literatuur over dit onderwerp (BATES, 1944; VAN EIMERN, 1964; CABORN, 1957; GLOYNE, 1954; NAEGELI, 1946/1965; SKIDMORE en HAGEN, 1970/1977; zie ook GRACE, 1977 en SPRIK, 1974).

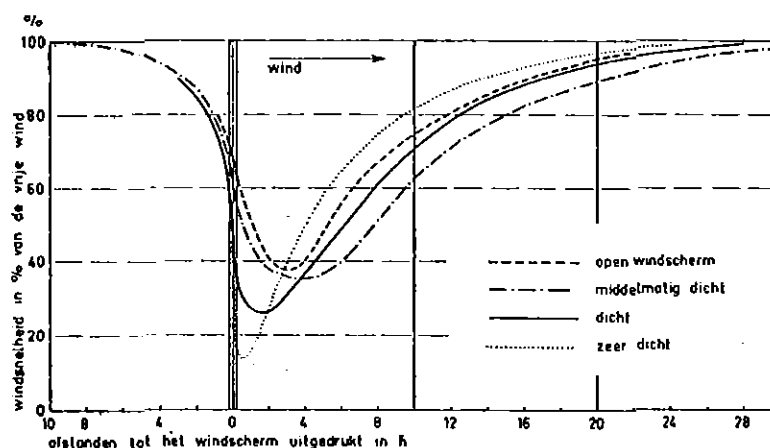


Fig. 28. Windremming door windschermen uit verschillende dichtheidsklassen

bron: SPRIK (1974) naar NAEGELI

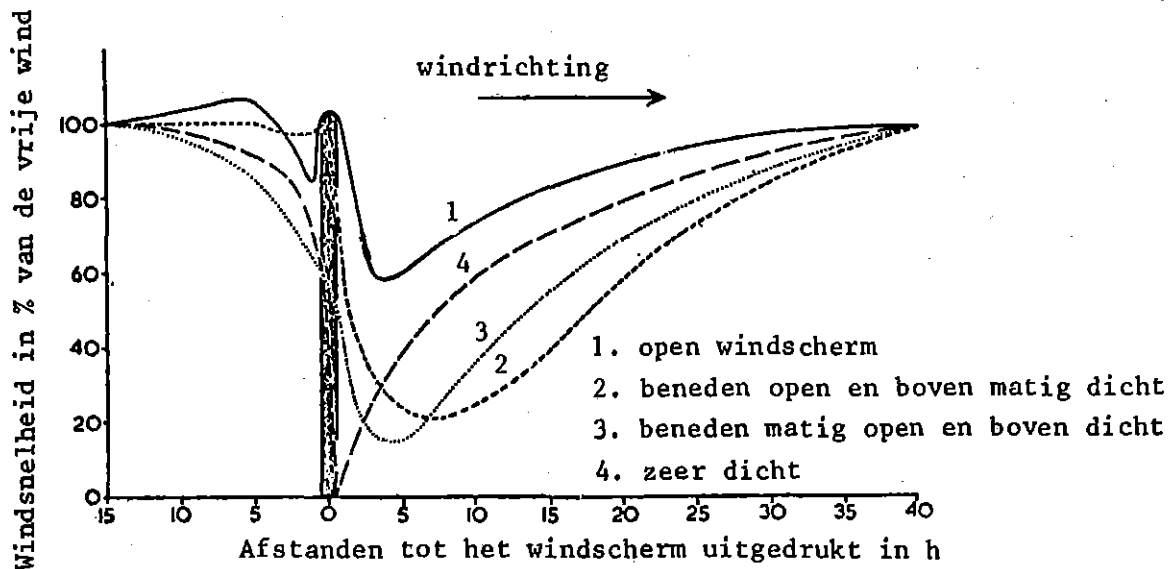


Fig. 29. Windremming met kunstmatige windschermen van verschillende dichtheidsklassen
bron: GLOYNE (1954)

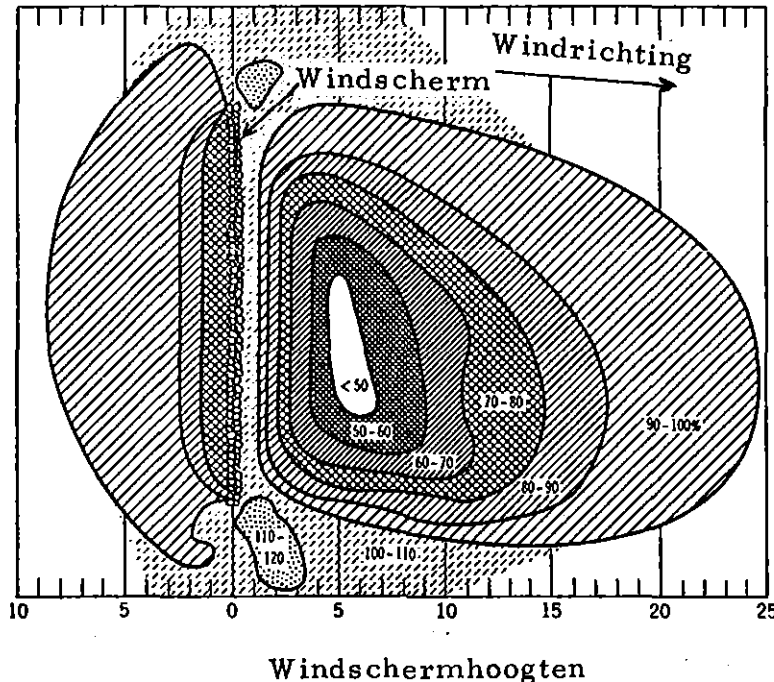
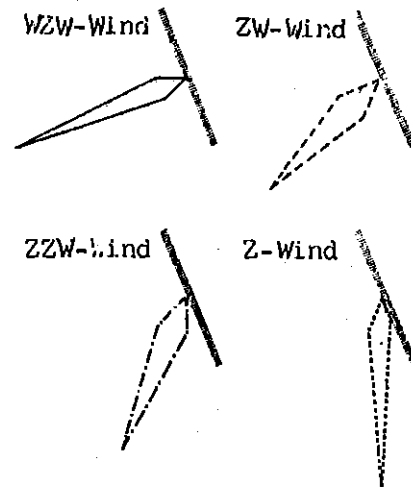
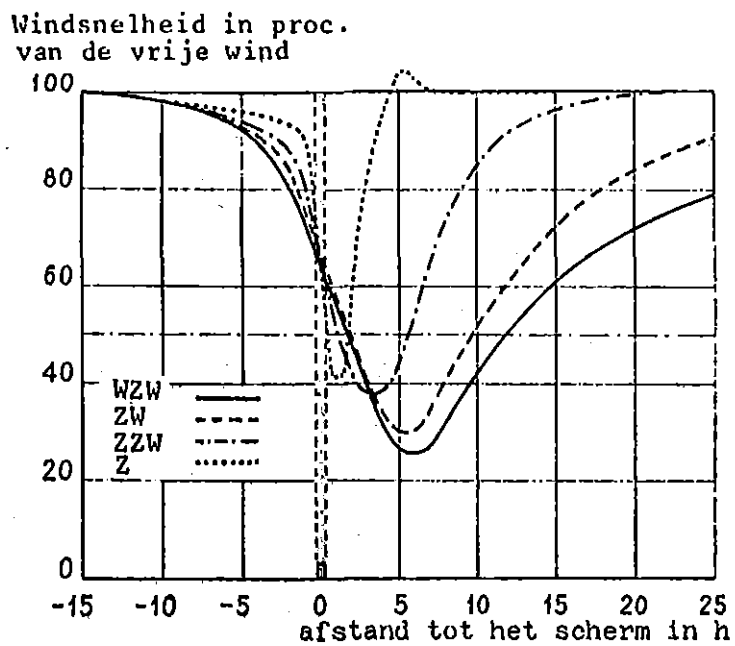


Fig. 30. Percentage van de vrije windsnelheid rond een windscherm met een gemiddelde dichtheid van 50%
bron: SCHWAB e.a. (1970) naar BATES



Hoekafwijking t.o.v. loodrecht op het scherm: WZW - 0g
ZW - 25g
ZZW - 50g
Z - 75g

Fig. 31. Windsnelheid in procenten van de vrije wind achter een halfdoorlatend scherm (47%) bij verschillende windrichtingen

bron: SPRIK (1974) naar NAEGELI

Windsnelheid in % van de
vrije wind

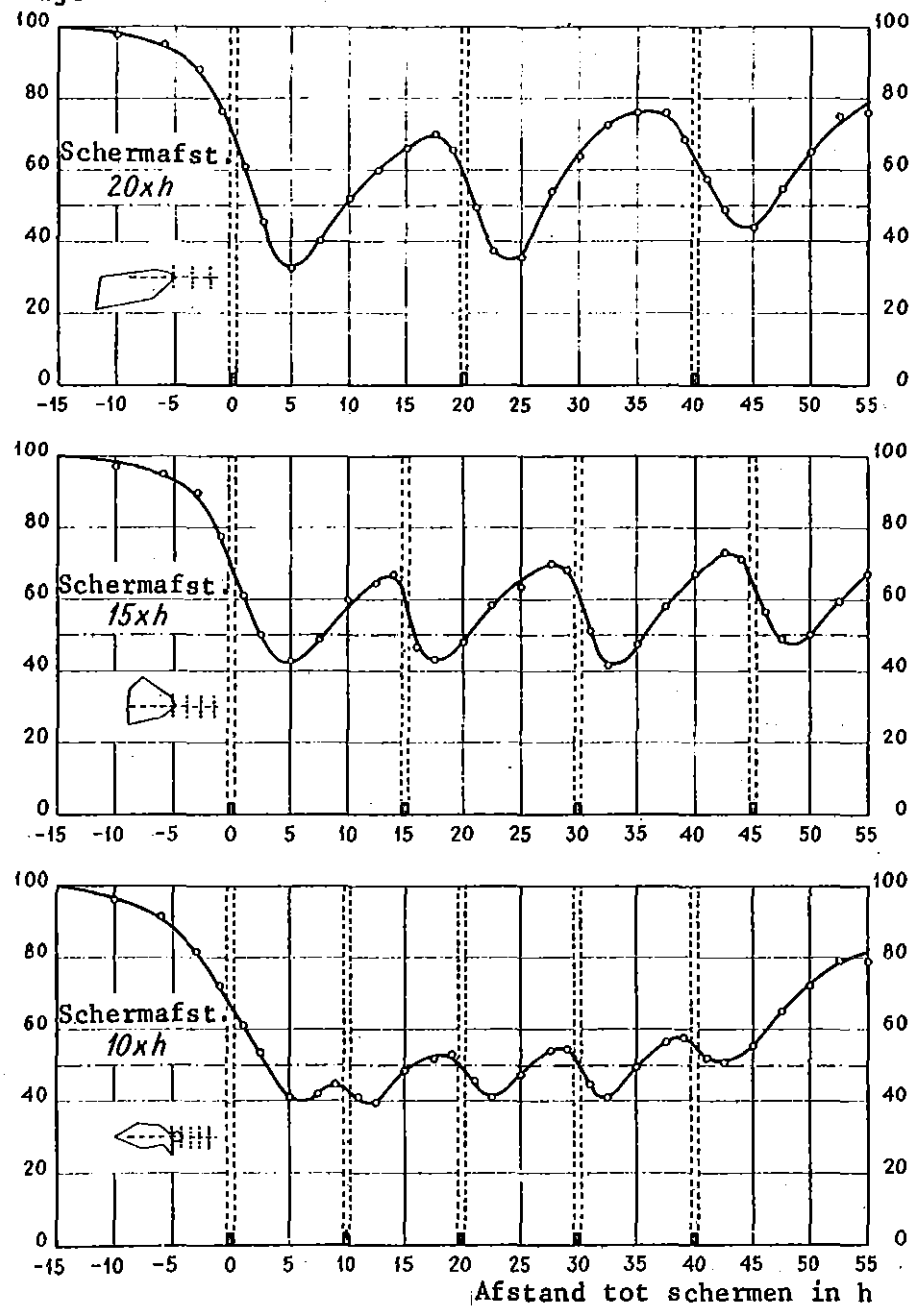


Fig. 32. Gemiddelde windsnelheden achter enkele parallelle kunstmatige windschermen bij verschillende onderlinge afstanden (windrichting nagenoeg loodrecht)
bron: SPRIK (1974) naar NAEGELI

Afname van de windsnelheid door verruwing betekent niet zonder meer minder kans op erosie. Door de grotere turbulentie kan op enige afstand van het scherm de schuifnelheid groter zijn dan in het vrije veld, waardoor, bij een overigens verlaagde windsnelheid, sneller erosie zal optreden. DOGILEVICH en VASILEV (1977) vonden in windtunnel experimenten, dat bij optimale afstand tussen (miniatur) schermen winderosie niet werd voorkomen. Hoewel de kans op erosie niet zonder meer kleiner wordt, kan men toch stellen dat de omvang sterk kan worden teruggedrongen. Door de windremming worden de losgemaakte deeltjes minder sterk versneld en minder ver getransporteerd, waarmee avanlanching vermindert. Bovendien onderbreken schermen het veld waardoor het proces wordt afgestopt en pas op enige afstand van het volgende scherm opnieuw kan beginnen. Tenslotte wordt het grootste deel van het getransporteerd materiaal, inclusief de stoffractie in het volgende scherm opgevangen.

Over het algemeen wordt er een redelijke tot goede winderosiebestrijdende werking aan windschermen toegekend, mits de onderlinge afstand niet meer dan 15 tot 25 H bedraagt, hetgeen voor grootschalige akkerbouwgebieden bezwaarlijk kan zijn. Vooral de omvang van erosie wordt aanzienlijk verkleind, daar deze evenredig is met de derde macht van de windsnelheid.

Windschermen hebben ook invloed op andere klimatologische omstandigheden, met name aan de lijzijde. Natuurlijke schermen als bomenrijen, struiken en hagen hebben daarnaast nog andere invloeden op hun omgeving. Over deze effecten van windschermen op de overige omstandigheden is minder eenstemmigheid. Globaal gesproken is er sprake van een lichte positieve invloed op de gewasproductie, hetgeen evenwel sterk afhankelijk is van het gewas en het klimaatstype. Neemt men echter tevens de ingenomen oppervlakte in beschouwing (1 tot 5% bij windsingels), dan lijkt uit een oogpunt van gewasopbrengst, de aanleg van windsingels niet zonder meer gerechtvaardigd. (McMARTIN e.a., 1974; SPRIK, 1974). Nader gespecificeerd kunnen de volgende bijverschijnselen aan de aanwezigheid van windsingels worden toegekend (uitgaande van een optimale uitvoering van een systeem van windsingels (-schermen) (zie ook SPRIK, 1974):

- **T e m p e r a t u u r s i n v l o e d e n.** De verminderde vermenging die optreedt bij veel straling in de onderste luchtlagen achter een windscherm kan overdag leiden tot hogere temperaturen ($1 \text{ à } 2^{\circ}\text{C}$), terwijl 's nachts bij onbewolkte hemel de temperatuur enkele graden lager kan zijn. De bodemtemperatuur kan $1 \text{ à } 2^{\circ}\text{C}$ hoger zijn. Van belang hierbij is tevens de positie van het scherm. De schaduwzijde zal doorgaans enigszins lagere temperaturen kennen, de zonzijde door extra reflectie, juist hogere. Deze verschillen zijn van belang voor kiem- en groeisnelheid (vroegheid), afrijping, maar ook aardappelopslag en verhoogde kans op nachtvorst.
- **V e r d a m p i n g.** Afname van de windsnelheid heeft afname van de verdamping tot gevolg. SKIDMORE en HAGEN (1970) vonden dat deze evenredig was met de afname van windsnelheid (zie fig. 33).

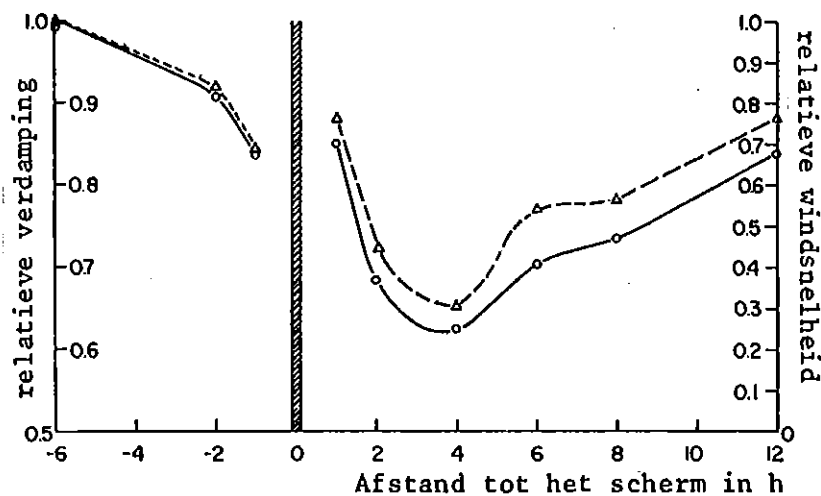


Fig. 33. De relatieve verdamping (----) en de relatieve windsnelheid (—) rond een kunstmatig windscherm met een doorlatendheid van 40%. Vrije windsnelheid $5,6 \text{ tot } 6,2 \text{ m s}^{-1}$. Meethoogte $0,6 \text{ m}$
bron: SKIDMORE en HAGEN (1970)

Anderen vonden een evenredigheid met de wortel van de afname van de windsnelheid. Ook andere factoren spelen echter een rol (straling, temperatuur), zodat dergelijke benaderingen met enige voorzichtigheid bekeken moeten worden.

- **L u c h t v o c h t i g h e i d.** Hoewel de luchtvochtigheid van veel factoren afhankelijk is, blijkt de invloed van windschermen aanwijsbaar. In de voormiddag blijkt er een verlagende invloed en gedurende de rest van de dag een verhogende invloed (VAN DER LINDE, 1958). Dit is onder meer van belang voor de verdamping en afrijping, en zoals eerder bleek, voor het erosiegevaar.
- **N e e r s l a g.** De invloed van schermen op de neerslag lijkt vrijwel nihil. Eventuele regenschaduw aan de lijzijde, wordt gecompenseerd door verhoogde neerslag even verderop. In geval van sneeuw is er een positief effect wanneer de schermen verstuiven van de sneeuw voorkomen en sneeuw van omringend land opvangen, hetgeen vooral in droge gebieden een belangrijke aanvulling voor het bodemvocht kan betekenen.
- **B o d e m v o c h t g e h a l t e.** Behalve als gevolg van bovenomschreven werking, is er vrijwel geen invloed van windbescherming op het bodemvochtgehalte. Wel in andere zin echter is er bij natuurlijke schermen sprake van invloed op de vochthuishouding. Mede door vochtconcurrentie in de nabijheid van het scherm (zie fig. 34) worden daar lagere opbrengsten gemeten.
- **O v e r i g e e f f e c t e n** zijn nog beschutting van vee en gebouwen (warmte) en een aantal nadelen, welke voornamelijk gelden bij natuurlijke windsingels; bewerkingsmoeilijkheden (meer randen; ondiepe wortels, vallende takken), vee concentratie (structuurverval), ziekten, schadelijke insecten, vogels en ander wild, concurrentie voor voedingsstoffen. Daarnaast leggen windsingels beslag op landbouwgrond en vragen onderhoud. Een positief gevolg is de productie van hout, terwijl de uitwerking op het landschap wel duidelijk is, maar minder eenduidig wordt gewaardeerd.

Dat laatste geldt wel, voor een meer afwisselende vorm van houtwallen welke echter geen verdere voordelen bieden en daarnaast aan-

zienlijk minder erosie verminderend werken. Een andere mogelijkheid is het bewerkstelligen van een minder geordend patroon van bosjes, bomenrijen en andere obstakels. De algehele verruwing, die daarvan het gevolg is werkt eveneens remmend op de windsnelheid, maar zal aanzienlijk minder effectief zijn dan een gesloten systeem van windsingels. Deze mogelijkheid (WARTENA, 1968) komt echter pas aan bod als de ruimte, beschikbaar voor aanplant, slechts een fractie is van die welke nodig is voor windsingels, of wanneer er geen overheersende windrichting is.

De resultaten, die in verschillende landen met windschermen worden gevonden variëren al met al nogal, onder meer door klimaatverschillen. Dat geldt evenzeer voor de samenstelling van natuurlijke windschermen, waarin snelgroeiers (veelal loofhout) voor een snelle verdichting zorgen waartussen langzaamgroeiers (naald- en loofhout) voor de duurzaamheid zorgdragen. Soms zal aan de overwegende windzijde met lage struiken een pyramide-achtige vorm aan de singel worden gegeven (zie o.a. JOACHIM e.a., 1961; READ, 1964; HAGEN, 1976). Eerder werd al het gebruik van schermen gevormd door lange grassoorten genoemd (GADE, 1978). Kunstmatige schermen zijn er in vele uitvoeringen, zoals plastic, stro, latten etc. (zie o.a. SHAH, 1962; GADE, 1978).

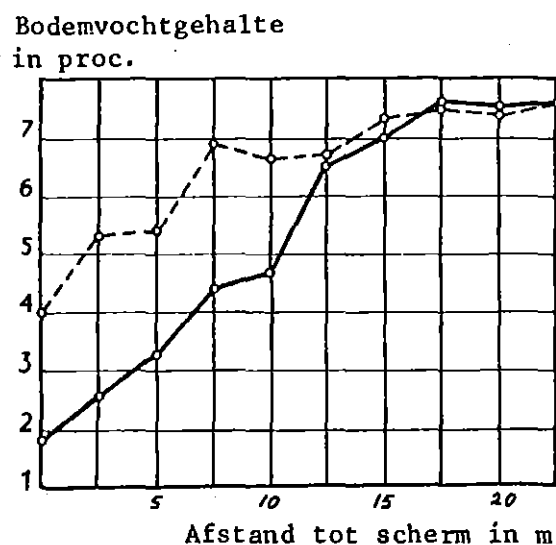


Fig. 34. Het vochtgehalte in de bodem op 20 cm diepte naast een bomenrij met doorgesneden wortels (----) en naast een bomenrij met intacte wortels (—) bron : SPRIK (1974) naar STEUBING

5.2. Verminderen van de erosiegevoeligheid

Dit kan worden bereikt door de samenhang tussen de bodemdeeltjes te verhogen met kunstmatige of natuurlijke middelen, dan wel door geheel of gedeeltelijk bedekken van de bodem met niet-erodeerbaar materiaal.

5.2.1. Vergroten van de samenhang tussen de bodemdeeltjes

Natuurlijke middelen om de samenhang tussen de bodemdeeltjes te vergroten zijn lutum, silt en organische stof, welke direct door cohesieve binding of indirect door waterbinding vorming van stabiele niet-erodeerbare aggregaatjes bevorderen. Daarnaast kan verstuiven van de bovengrond direct worden tegengegaan door toevoegen van water.

L u t u m e n s i l t. Verhogen van het lutum- en siltgehalte van de bovengrond kan worden bereikt door toevoeging van buitenaf (aanvoer) of door opbrengen vanuit de ondergrond. De eerste vorm wordt op kleine schaal in Nederland toegepast, bij het aanbrengen van zuiveringsslib op zandgronden (KNOTTNERUS, 1974). Zelfs dan is het echter een zeer dure maatregel, die bovendien het gevaar van verslemping met zich meebrengt. De tweede methode biedt meer mogelijkheden, vooral daar waar kleibanken of een dichte kleiondergrond de vochthuishouding nadelig beïnvloeden. Opbrengen of diepwoelen hebben dan dubbel voordeel: het winderosiegevaar wordt verkleind terwijl door een verbeterde vochtnalevering opbrengstverhoging wordt bereikt (MASSOUD, 1973; WIEBING en WIND, 1977).

O r g a n i s c h e s t o f. Verhogen van het organische stofgehalte zal vooral bij zandgronden goede resultaten geven. Op gronden met een hoog lutumgehalte kan toevoegen van organische stof tot gevolg hebben, dat aggregaatjes uiteenvallen en daarmee de erosiegevoeligheid wordt vergroot (zie o.a. CHEPIL en WOODRUFF, 1963).

Toevoegen van organische stof voor een blijvende verhoging van het humusgehalte vraagt enorme hoeveelheden organisch materiaal over een lange periode en is om die reden vrijwel onuitvoerbaar. Deze maatregel moet dan ook worden gezien als een middel om het bestaande gehalte op peil te houden en daarmee vruchtbaarheid en vochthoudend vermogen te bewaren, terwijl de winderosie-werende werking slechts van korte duur is (seizoen).

De meest voor de hand liggende methode is het achterlaten van oogstresten op het veld, deze te verspreiden, gedeeltelijk in te rijden, of zoveel mogelijk onder te werken. Om het organisch stofgehalte op peil te houden zal er tevens van buiten moeten worden aangevoerd: stro, stalmest, stadscompost en zuiveringsslib. Het bezwaar van deze methoden is de behoefte aan extra stikstof en soms de moeilijkheden die zij opleveren bij de bewerking van het veld. Het eerste probleem vervalt bij gebruikmaking van groenbemesters als tussengewas. LARSEN en ØVIG (1979) beschrijven een methode van toevoeging van stro aan de bodem, waarbij deze slechts langzaam afbreekt en er geen extra stikstof nodig is. Zij brengen daartoe de stro op enige diepte (onder de Ap-horizon) in. Daarvan is echter zeker voor het eerste jaar geen erosiebestrijdend effect te verwachten. Een veel toegepaste methode naast achterlaten van oogstresten is het opbrengen van stal- of drijfmest (gieren), waarmee niet alleen organische stof wordt toegevoegd, maar tevens water, waardoor een kortdurende directe bescherming wordt verkregen. Bovendien wordt hierbij vaak een korstje gevormd, welke zolang deze intact is, de bodem een goede bescherming biedt (zie o.a. WOODRUFF e.a., 1974/1972; FRYREAR en KOSHI (1971; MONNIER, 1965; KNOTTNERUS en PEERLKAMP, 1972; ARS, 1977).

T o e v o e g i n g v a n w a t e r. Naast toevoegen van bovengenoemde middelen, heeft ook verdichten van de grond een grotere vochtbinding tot gevolg. Het effect daarvan voor directe bescherming tegen winderosie is echter nihil bij een sneldrogende bovenlaag (stuiven van vochtig strand). Datzelfde geldt voor de mogelijkheid om via een hoge grondwaterstand voor een vochtige bovengrond te zorgen. Bij enige oneffenheid zullen de hoogste plekken snel uitdrogen en zal de erosie daar een aanvang nemen. Wel effectief is toevoeging van water van bovenaf in kleine hoeveelheden zolang het stuifgevaar aanhoudt. Dit kan echter alleen via berekening, hetgeen alleen vanuit een oogpunt van erosiebestrijding een te hoge investering betekent (zie o.a. ANONYMUS, 1967). Een tamelijk rigoreuse maatregel is het aanbrengen van een ondoorlatende asfaltlaag onder de bouwvoor om waterverlies naar de ondergrond tegen te gaan (MASSOUD, 1973). Dit leidt echter tot sterke verzouting, naast andere bezwaren.

K u n s t m a t i g e m i d d e l e n (chemisch) zijn te verdelen in 1. korstvormende preparaten en 2. middelen die de vorming van stabiele, niet-erodeerbare aggregaatjes bevorderen.

Deze meer of minder visceuse vloeistoffen of vloeistofachtige preparaten van kunstmatige oorsprong, welke zijn gemengd met, of opgelost, geëmulgeerd of gesuspenderd in water of een andere vloeistof van geringe dikte, worden op de grond gespoten, waarna een dichte korst zich vormt, dan wel na lichte, ondiepe bewerking niet-erodeerbare aggregaatjes worden gevormd.

De belangrijkste eisen, die aan deze middelen gesteld worden zijn (ARMBRUST, 1977): 1) de kosten van middel, plus de toedieningskosten mogen de 250 gulden per hectare niet te boven gaan; 2) zij moeten minstens een maand hun werking blijven behouden en bovendien makkelijk bewerkbaar zijn; 3) zij mogen geen nadelige gevolgen hebben voor de kwaliteit en de hoeveelheid van gewasopbrengst.

Uit de vele literatuur over dit onderwerp blijkt dat aan deze voorwaarden vrijwel niet kan worden voldaan. Een aantal middelen spoelt gemakkelijk uit, hetgeen herhaalde toepassing in één seizoen nodig maakt. Ook onschadelijkheid voor plant en dier staat niet voor alle middelen vast. Schurend zand van naburige percelen kan gemakkelijk gaten maken in een dichte korst, waarmee een startpunt voor stuiven is verkregen. Kiemplantjes moeten door de korst heen kunnen breken, hetgeen echter ook daar een startpunt voor erosie geeft (ARMBRUST, 1977; ARMBRUST en LYLES, 1975; DE BOODT, 1972; DE BOODT en BISSCHOP, 1971; KNOTTNERUS, 1980, KULLMANN e.a., 1978; LYLES e.a. 1969/1974; PASAK, 1969; STEWART, 1973 en ZGADZAY, 1977).

5.2.2. Afdekken van de bodem

Tenslotte is er nog de mogelijkheid de bodem geheel of gedeeltelijk te bedekken. Gedeeltelijke bedekking door middel van schelpen of grind, waarbij het gehalte aan de oppervlakte groter dan 60% moet bedragen minimaliseert het erosiegevaar, maar is zeker in de hooggemechaniseerde grootschalige akkerbouw nauwelijks uitvoerbaar. Afdekken met plastic, stromatten, boomschors en vele andere middelen (zie o.a. KNOTTNERUS en PEERLKAMP, 1972; FAO, 1960) is ook slechts toepasbaar op kleine schaal.

6. NAWOORD

Bestrijding van winderosie is bovenal een zaak van onderkenning van het gevaar door de landgebruiker. Duidelijk moet het gevaar van een bestaandbouwsysteem worden aangetoond voordat er zinvol aan bestrijdingsmethoden gedacht kan worden. Is men zover, dan zal de mogelijkheid geschapen moeten worden om een samenhangend geheel van maatregelen te treffen: slechte gronden uit cultuur, zorgen voor een zoveel mogelijk continue vegetatie door strokenbouw, tussengewassen en stoppelmulchen, terugbrengen of achterlaten van zoveel mogelijk organisch materiaal op het veld. In veel gevallen kan een systeem van windschermen en -singels een belangrijke aanvulling hierbij zijn. Gebruik maken van kunstmatige spuitmiddelen, beregenen en afdekmiddelen zal slechts in noodgevallen of mede om andere redenen verantwoord zijn.

LITERATUUR

- AASE, J.K. and F. SIDDOWAY, 1976. Influence of tall wheatgrass wind barriers on soil drying. *Agronomy journal* 68 (4):627-631
- AHMAN, R., 1975. Wind erosion in Southern Scania. *Geo Abstracts* 75A/2061
- ALLEN, R.R., B.A. STEWART and P.W. UNGER, 1977. Conservation tillage and energy. *Journal of Soil and Water Conservation* 32 (3):84-89
- ALLMARAS, R.R., E.A. HALLAUER, W.W. NELSON and S.D. EVANS, 1977. Surface energy balance and soil thermal property modification by tillage-induced soil structure. Technical Bulletin 306-Agr. Exp. Station, Univ. of Minnesota
- ANONYMUS, 1965. Die Erhöhung der Furchtbarkeit der Sandböden. Vorträge der Internationalen Koordinierenden Arbeitstagung in Budapest. Akadémiai Kiadó, Budapest
- ARMBRUST, D.V. and L. LYLES, 1975. Soil stabilizers to control wind erosion. *Soil Science Society of America. Proceedings* 39 (7):77-82
- 1977. A review of mulches to control wind erosion. *Transactions of the ASAE* 20 (5):904-905, 910
- ARS, 1977. Research progress and needs-conservation tillage. Agricultural Research Service. US Dept. of Agr. North Central Region
- AZIZOV, A., 1977. Influence of soil moisture on the resistance of soil to wind erosion. *Soviet Soil Science* 9 (1): 105-108
- BAGNOLD, R.A., 1941. The physics of blown sand and desert dunes. Methuen London
- 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Surveys Professional Paper 422-I
- BATES, C.G., 1944. The windbreak as a Farm Asset. US Dept. Agr. Farmers' Bulletin. 1405
- BEASLY, R.P., 1974. How much does erosion cost? *Soil Survey Horizons* 15 (1):8-9
- BELLY, P.Y., 1964. Sand movement by wind. US Army CERC. nr. 1, 38+41p
- BENBROOK, C., 1979. Integrating soil conservation and commodity programs: A policy proposal. *Journal of Soil and Water Cons.* 34 (4):160-167

- BENNETT, O.L. e.v.a., 1977. Conservation tillage in Canada and United States. Veel artikelen van verschillende auteurs. Journal of Soil and Water Cons. 32 (1):9-65
- BERGSMA, E., 1979. Aerial photo-interpretation for accelerated wind erosion study and conservation planning. ITC journal nr. 3
- BISAL, F. and K.F. NIELSEN, 1962. Movement of soil particles in saltation. Can. Journal of Soil Science 42 (1):81-86
- _____ and J. HSIEH, 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. Soil Science Vol. 102 (3):143-146
- _____ 1968. Influence of plant residue on sand flow in a wind tunnel. Can. Journal of Soil Science 48 (1):49-52
- _____ and W.S. FERGUSON, 1968. Monthly and yearly changes in aggregate size of surface soils. Can. Journal of Soil Science 48 (2):159-164
- _____ and W.S. FERGUSON, 1970. Effect of non-erodible aggregates and wheat stubble on initiation of soil drifting. Can. Journal of Soil Science 50 (1):31-34
- _____ 1973. Initiation of movement of soil aggregates. Can. Journal of Soil Science 53 (4):481-482
- BLACK, A.L. and F.H. SIDDOWAY, 1971. Tall wheatgrassbarriers for soil erosion control and water conservation. Journal of Soil and Water Cons. 26 (3):107-111
- BOCHAROV, A.P., 1968. Calculation of the permissible content of the erodible material in soil. Vest. Sel'-Khez.Nauki, Mosk. no.12:104-108
- BODEMKUNDE, 1976. Cursus Bodemkunde. Delen I, II en III + bijlagen. Consulentenschap voor bodemaangelegenheden in de landbouw. Uitg. Min. L. en V. (3e druk)
- BODOLAY, S., 1974. Wind erosion control on agricultural lands. Transaction 10th Intern. Congress of Soil Science XI: 112-119
- BORSY, Z., 1975. Recent results of winderosion studies in Hungarian blow-sand areas. Geo Abstracts 75A/2062
- BRESSOLIER, C. and Y.F. THOMAS, 1977. Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes. Journal of Sedimentary Petrology 47:331-338

- BRONGEEST, J.J.W.V. en L.A.M. VAN PERLO, 1979. Winderosiebestrijding in Denemarken. Verslag van een studiereis, juli 1978. Staatsbosbeheer
- CABL, 1969. 10 jaren windsingelonderzoek. Commissie voor Agrarische Belangen in Limburg
- CABORN, J.M., 1957. Shetterbelts and microclimate. Dept. Forestry, Edinburgh Univ. Bulletin, 29 (135 pp)
- CARSON, M.A., 1971. The mechanics of erosion. Pion Ltd, London
- CHEPIL, W.S., 1951. Properties of soil which influence winderosion. V. Mechanical stability of structure. Soil Science vol. 72; 465-478
- _____ 1955. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, silt and clay. Soil Science vol. 80: 155-162
- _____ 1956. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. Soil Science Soc. Amer. Proceedings 20 (2): 288-292
- _____ and N.P. WOODRUFF, 1957. Sedimentary characteristics of dust storms: II. Visibility and dust concentration. Amer. J. Sci. 225: 104-114
- _____ and N.P. WOODRUFF, 1959. Estimations of wind erodibility of farm fields. US Dept. Agr. Res. Serv. Research Report 25: 1-21
- _____ 1962. A compact rotany sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. Soil Science Society of America Proceedings 26 (1): 4-6
- _____ F.H. SIDDOWAY and D.V. ARMBRUST, 1962. A climatic factor for estimating wind erodibility of farm field. Journal of Soil and Water Cons. 17 (4): 162-165
- _____ and N.P. WOODRUFF, 1963. The physics of wind erosion and its control. Advances in Agronomy 15: 211-302
- _____ F.H. SIDDOWAY and D.V. ARMBRUST, 1964. Wind erodibility of knolly terrain. Journal of Soil and Water Cons. 19 (5):179-181
- COETERIER, J.F., 1974. De betekenis van de omgeving III; De Veenkoloniën. Rijksinstituut De Dorschkamp, Wageningen
- CRONEY, D., J.D. COLEMAN and P.M. BRIDGE, 1952. The suction of moisture held in soil and other porous materials. Road Res. Techn. Paper. 24

- DAVIES, D.B. and M.F. HARROD, 1970. The processes and control of wind erosion. NAAS Quaterly Review. nr. 88: 139-150
- DE BOODT, M. en F. DE BISSCHOP, 1971. Bodemstabilisatie en structuuratie met behulp van geëmulgeerde bitumen en polymeren. Cultuurtechn. Tijdschrift 9 (5):199-208
- _____ (ed), 1972. Proceedings symposium on the fundamentals of soil conditioning. Gent, April 1972. Meded. fac. Landbouwwetenschappen Rijksuniv. Gent. 37 (3): 897-1167
- DE VREEDE, M., 1977. Mensen en woestijnen. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage
- DOLGILEVICH, M.I. and Yu.I. VASILEV, 1974. Windtunnel for simulating the wind erosion of soils. Soviet Soil Science 6 (3):340-345
- _____ 1977. Resistance of soils to winderosion and its nature. Soviet Soil Science 9 (2):199-203
- _____ and Yu.I. VASILEV, 1977. The nature of the forces acting on an erodible partical on the leeward side of a treebelt. Vestn. Sel'-khez.Nauki, Mosk. no. 2:35-37
- DOUWES, B.J., 1978. Wettelijke Regelingen. Handboek voor Milieubeheer, deel IV-Bodembescherming. Hoofdstuk 11:1-44
- DOWNES, J.D., D.W. FRYREAR, R.L.WILSON and C.M. SABOTA, 1977. Influence of wind erosion on growing plants. Transaction ASAE 20 (5):885-889
- ECKHOLM, E.P., 1976. Losing ground. Norton-New York
- EPPINK, L.A.A.J., 1978. Erosie, erosiebestrijding en bodembescherming. Bodemtechniek deel E.L.H. Cultuurtechniek, Wageningen
- ESHUIS, J.A., 1941. Ontginning van veengronden. Uit: Het veen en zijn ontginning pp 55-90, KNHM
- FAN, L.T. and L.A. DISRUD, 1977 (NOTE). Transient winderosion: A study of the non-stationary effect on rate of winderosion. Soil Science 124 (1): 61-65
- FAO, 1960. Soil erosion by wind and measures for its control on agricultural lands. FAO Agr. Paper no. 71
- _____ 1977. Organic materials and soil productivity. FAO Soils Bulletin no. 35

- FENSTER, C.R. and G.A. WICKS, 1977. Minimum tillage fallow systems for reducing wind erosion. Transaction ASAE 20 (5): 906-910
- FISCHER, P.S. and E.L. SKIDMORE, 1970. Weros: a Fortran IV program to solve the wind erosion equation. US Dept. Agr. Res. Serv. no. 41-174
- FORNSTROM, K.J. and R.D. BOEHNKE, 1976. A growing mulch tillage system to reduce wind erosion losses of sugarbeets. Journal of Amer. Soc. of Sugarbeets. Technologists 19 (1): 64-73
- FOTH, H.D., 1978. Fundamentals of soil science. 6th ed. Wiley and Sons
- FRYREAR, D.W., 1971. Survival and growth of cottonplants damaged by windblown sand. Agronomy Journal 63 (4): 638-642
- _____ en P.T. KOSHI, 1971. Conservation of sandy soils with a surface mulch. Transactions ASAE 14 (3): 492-495
- _____ and C.L. WIEGAND, 1974. Evaluating wind erosion from aerial photos. Transaction ASAE 17 (5): 892-894
- _____ and J.D. DOWNES, 1975. Consider the plant in planning wind erosion control systems. Transaction ASAE 18 (6):1070-1072
- _____ and L.LYLES, 1977. Wind erosion research. Accomplishments and needs. Transactions ASAE 20 (5):916-918
- GADE, D.W., 1978. Windbreaks in the Lower Rhone valley. Geographical Review 68 (2):127-144
- GILLETTE, D.A., 1977. Fine particle emmissions due to wind erosion. Transaction ASAE 20 (5):890-897
- GLOYNE, R.V., 1954. Some effects of shelterbelts upon local and microclimate. Forestry 27, 2:85-95, London
- GRACE, J., 1977. Plant response to wind. Academic Press. London 204 pp
- GRANT, K.E., 1975. Erosion '73-'74. The record and the challenge. Journal of Soil and Water Cons. 30(1):29-31
- HAG, B.A., 1978. De snijmaisteelt in N.O.-Nederland en de resultaten van het snijmais-onderzoek in dit gebied. Uit: Onderzoek 1978, pp 99-103. Stichting voor de Akkerbouwproefboerderijen
- HAGEN, L.J., E.L. SKIDMORE, J.D. DICKERSON, 1972. Designing narrow strip barrier systems to control wind erosion. Journal of Soil and Water Cons. 27(6):269-272
- _____ 1976. Windbreak design for optimum wind erosion control- In: Proceedings of the Symposium Shelterbelts on the Great Plains. Denver, C.O. April pp. 31-36

- HARTGE, K.H., 1975. Zie Stewart, B.A., 1975
- HAYES, W.A., 1972. Designing wind erosion control systems in the Midwest region. RTSC-Agron.Tech.Note LI-9. Soil Cons. Serv. USDA. Lincoln
- HOYLE, B.J. and H. YAMADA, 1975. Zie Stewart, B.A., 1975
- HUDSON, N., 1973. Soil Conservation. B.T. Batsford Ltd. London
- IB, 1979. Onderzoeksjaarverslag 178. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.)
- JOACHIM, H.F., A. KRUMSDORF and H. GORITZ, 1961. Flurholzanbau-Schutzpflanzen. V.E.B. Deutscher Landwirtschaftsverlag
- KALYANOV, K.S., 1974. Natural rythm and soil utilization. Transactions 10th Int. Congres of Soil Science V:102-106
- KEUNING, H.J., 1935. De Groninger Veenkoloniën
- KIMBERLIN, L.W., A.L. HIDLEBAUGH, and A.R. GRUNEWALD, 1977. The potential wind erosion problem in the U.S. Transactions ASAE 20 (5):873-879
- KNMI, 1972. Gegevens- en meetprogramma uitwisseling KNMI-Rijkswaterstaat. Rapp. van de Werkgr. Rijkswaterstaat-KNMI-data
- KNOTTNERUS, D.J.C., 1971. Winderosie- en bodemonderzoek met behulp van een windtunnel. Landbouwk, tijdschr. 83(1):90-95
- _____ en P.K. PEERLKAMP, 1972. Het stuiven van grond. Wat er tegen te doen? Bedrijfsontwikkeling 3(2):175-179
- _____ 1973. Winterrogge als bodembescherming tegen winderosie. Bedrijfsontwikkeling 4(11):1023-1031
- _____ 1974. Zuiveringsslib als bodembeschermend materiaal tegen winderosie. Rapp. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.)
- _____ 1976. Stabilisation of a wind erodible surface by hydro-seeding (town refuse compost). Meded. fac. Landbouwwet, Rijksuniv. Gent 41(1):69-71
- _____ 1980. Maatregelen aan het stuifgevoelig grondoppervlak ter bestrijding van erosie door wind. Nog te verschijnen
- KOVDA, V.A., 1977. Soil Loss: an overview. Agro-ecosystems 3(3): 205-224

- KUIPER, J., 1978. Mogelijkheden en moeilijkheden bij de bestrijding van stuifgevaar. Uit: Onderzoek 1978. pp 91-97. Stichting voor de Akkerbouwproefboerderijen
- KULLMANN, A., F. FICHTNER, J. LEHFELDT en K.H. MORSTEIN, 1978. Bekämpfung der Winderosion mit synthetischer Bodenverbesserungsmitteln. Archiv. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde. 22(11): 713-719
- LARSEN, V. and J.K. Øvig, 1979. Halm til jordforbedring af sandjord. (Straw as amendment to sandy soils). Det Danske Hedeselskab. Meddelelse no. 8
- LUMKES, L.M. en H.A. TE VELDE, 1973. Akkerbouw op stuifgevoelige gronden. Publ. no. 11 PAGV. Lelystad
- LYLES, L., et al. 1969. Spray-on adhesives for temporary winderosion control. Journal of Soil and Water Cons. 24(5):190-193
- _____ and R.K. KRAUSS, 1971. Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence. Transactions ASAE 14(3):563-566
- _____ and R.L. SCHRANDT, 1972. Wind erodibility as influenced by rainfall and soil salinity. Soil Science 114 (5):367-372
- _____ , R.L. SCHRANDT and N.F. SCHMEIDLER, 1974. How aerodynamic roughness elements control sand movement. Transactions ASAE 17(1):134-139
- _____ , R.L. SCHRANDT and N.F. SCHMEIDLER, 1974. Commercial soil stabilizers for temporary winderosion control. Transactions ASAE 17(6):1015-1019
- _____ and B.E. ALLISON, 1975. Winderosion: uniformly spacing non-erodible elements eliminates effects of wind direction variability. Journal of Soil and Water Cons. 30(5):225-227
- _____ and B.E. ALLISON, 1976. Winderosion: the protective role of simulated standing stubble. Transactions ASAE 19(1):61-64
- _____ 1977. Winderosion: Processes and effect on soil productivity. Transaction ASAE 20(5):880-884
- McMARTIN, W., A.B. FRANK and R.H. HEINTZ, 1974. Economics of shelterbelt influence on wheat yields in N.-Dakota. Journal of Soil and Water Cons. 29(2):87-91

- MASSOUD, F.I., 1973. Physical properties of sandy soils in relation to cropping and soil conservation practices. In: Sandy Soils FAO Soils Bulletin, no. 25
- MEYER, E.N.C., 1975. Stro als middel tegen stuiven op stuifgevoelige gronden. Landbouwmmechanisatie 26(2):182-183
- MIEDEMA, E., 1950. Stuivende gronden in Nederland
- MONNIER, G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale du sol. Thèse, Paris
- NAEGELI, W., 1946. Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Mitt. Schweiz Anst. forstl. Versuchswes. 24(2):659-737
- _____, 1965. Über die Windverhältnisse in Bereich gestaffelter Windschutzstreifen. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswes. 41(5):219-300
- PASÁK, V., 1969. Sulphite waste liquor for protecting soil against winderosion. Ved. Pracé Vyskum. Ust. Melior 10:143-148
- _____, 1970. Wind erosion on soils. Scientific Monographs no. 3
- PATTERSON, E.M., D.A. GILLETTE and G.W. GRAMS, 1976. The relation between visibility and the size number distribution of airborne soil particles. Journal of Applied Meteorology 15:470-478
- PEERLKAMP, P.K., 1970. Grondverstuivingen en hun bestrijding. Jaarverslag 1970 pp 74-86. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.)
- POLYAKOV, Ye Yu, 1976. Polymers - soil conditioners and nitrogen fertilizers. Soviet Soil Science 8(4):443-446
- READ, R.A., 1964. Tree windbreaks for the Central Great Plains. Agr. Handbook 250. Forest Service. US Dept. Agr.
- RICHTER, G. und W. SPERLING, 1976. Bodenerosion in Mittel-Europa. Wege der Forschung Band 430. Wissensch. Buchgesellsch., Darmstadt
- ROSCHKE, G., 1974. Land- und Bodenabtragung durch böigen Wind. Zeitschr. für Kulturtechnik und Flurbereinigung 15(1): 6-20
- SCHRÖDER, G. und G. SCHWERTFEGGER, 1979. Windschutz auf leichten Böden II. Zeitschr. für Kulturtechnik und Flurbereinigung 20(2):113-116

- SCHRIJVER, H. (ed), 1975. 'Veenkoloniën'. Rapport van een werkgroep.
 Werkgroep Planologie. L.H. Wageningen
- SCHWAB, G.O., R.K. FREVERT, K.K. BARNES and T.W. EDMINSTER, 1971.
 Elementary Soil and Water Engineering. Wiley and Sons 2nd ed.
- SCHWERDTFEGER, G. und G. SCHRÖDER, 1976. Windschutz auf leichten
 Böden I. Zeitschr. für Kulturtechnik und Flurbereinigung.
 17(6):349-357
- SCOTT, H.D., M.S. OFFUTT and R.F. FORD, 1976. Use of winter cover as
 a deterrent to winderosion. Arkansas Farm Research 25, 2, 8
- SEEVERS, P.M., D.T. LEWIS and J.V. DREW, 1975. Use of ERTS-1 imagery
 to interpret the winderosion hazard in Nebraska's Sandhills.
 Journal of Soil and Water Cons. 30(4):181-183
- SHAH, S.R.H., 1962. Studies on wind protection. Thesis. L.H. Wageningen.
 Meded. 60 ITBON, Arnhem
- SHAW, R.H., 1977. Secondary wind speed maxima inside plant canopies.
 Journal of Applied Meteorology 16(5):514-521
- SHIYATYI, E.I., A.B. LAVROSKII and M.I. KHMOLLENKO, 1972. Effect of
 mechanical composition on cohesion and resistance to erosion
 of soil crumbs. Pochvovedenie no. 2:88-95
- SHORT, J.L., 1971. Musterd makes the best windbreak. Arable Farmer,
 dec. pp 38-39
- SIDDOWAY, F.H., W.S. CHEPIL and D.V. ARMBRUST, 1975. Effect of kind,
 amount and placement of residue on wind erosion control.
 Transaction ASAE 8(3):327-331
- SIMMONS, S.R. and A.D. DOTZENKO, 1974. Proposal indices for estimating
 the inherent wind erodibility of soils. Journal of Soil and
 Water Cons. 29(5):275-276
- _____ and A.D. DOTZENKO, 1975. Evaluation of conservation tillage
 effectiveness on sugarbeet fields in Northeastern Colorado.
 Journal of Am. Soc. of Sugarbeet Technology 18(4):307-311
- SINGH, R.S., 1957. Soil conservation education in villages - a
 pilot experience in Etawah. Journal of Soil and Water Cons.
 in India. 5(4):188-190
- SINGH, Y.P., 1966. Soil conservation extension in two Danodar Valley
 villages. Journal of Soil and Water Cons. in India 14(3/4):
 1-14

- SINHA, B.K., 1970. The effect of tillage operations and wheat stubble on wind erosion. *Journal Res. Punjab Agr. Univ.* 7:178-182
- SKIDMORE, E.L. and N.P. WOODRUFF, 1968. Winderosion forces in US and their use in predicting soil loss. *Agr. Handbook* 346. Agr. Res. Serv. US Dept. Agr.
- _____, P.S. FISHER and N.P. WOODRUFF, 1970. Winderosion equation: computer solution and application. *Proceedings Soil Sci. Soc. Am.* 34:931-935
- _____, and L.J. HAGEN, 1970. Evaporation in sheltered areas as influenced by windbreak porosity. *Agr. Meteorology* 7 (5): 363-374
- _____, and L.J. HAGEN, 1977. Reducing winderosion with barriers. *Transactions ASAE* 20(5):911-915
- SMALLEY, I.J., 1970. Cohesion of soil particles and the intrinsic resistance of simple soil system to winderosion. *Journal of Soil Science* 21:154-161
- SPRIK, J.B., 1974. Het effect van windbeschutting op Landbouwgewassen in Nederland. ICW nota 820
- STAATSBLAD 694, 1977. Herinrichtingswet Oost-Groningse en Gronings-Drentse Veenkoloniën
- STAKMAN, W.P., 1968. Bepaling van vochtspanning en vochtgehalte van gronden door middel van dampspanningsevenwichten. *Verslagen landbk. onderzoekingen* 693. Pudoc, Wageningen
- STEWART, B.A. (ed), 1975. *Proceedings of Symposium Experimental methods and uses of soil conditioners.* Las Vegas, Nov.1973
 SSSA Special Publ. Series no. 7
- STIBOKA, 1965. *Bodem van Nederland*
- STREEKPLAN, 1979. *Streekplan Oost- en Zuid-Oost Drente*
- STREEKPLAN, 1977. *Voorontwerp Streekplan Provincie Groningen*
- STURROCK, J.W., 1975. The control of wind erosion in crop production
Progress in Biometeorology C 1975(1):349-368
- TELLER, J.T., 1972. Eolian deposits of clay sand. *Journal of Sedimentary Petrology.* 42(3):684-686
- TOOGOOD, J.A., 1979. Comparison of soil temperatures under different vegetative covers at Edmonton. *Can. Journal of Soil Science* 59(3):329-335

- TOWNER, G.D. and E.C. CHILDS, 1972. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. *Journal of Soil Science*, 23(4):481-498
- VAN DER LINDE, R.J., 1958. Het probleem van de houtopstanden in het cultuurlandschap. *Centr. voor Landbouwdoc. Lit. overz. no.21* Wageningen
- VAN EIMERN, J., 1964. Effects of windbreaks and shelterbelts. W.M.O.
- VOORHEES, W.B., R.A. YOUNG and L. LYLES, 1979. Wheel traffic considerations in erosion research. *Transactions ASAE* 22(4): 786-790
- WARTENA, L., 1968. Een bijdrage tot het inzicht in windbeschutting. *Tijdschrift KNHM* 79:174-181
- WIEBING, R. en G.P. WIND, 1977. Grondverbetering beperkt droogteschade in de Veenkoloniën. *Bedrijfsontwikkeling* 8(6):591-594
- WILSON, L., 1975. Application of the winderosion equation in air pollution surveys. *Journal of Soil and Water Cons.* 30(5): 215-219
- WIND, G.P., 1979. Grondverbetering, conservering van veen en winderosie in de veenkoloniën. *Landbouwkundig tijdschrift* 91(3): 71-75
- _____ 1979. Analog modelling of unsaturated flow. Thesis Landbouwhogeschool, Wageningen
- WINKLER, E.M., 1976. Natural dust and acid rain. *Water, Air and Soil Pollution*. 6(2-4):295-302
- WOODRUFF, N.P. and F.H. SIDDOWAY, 1965. A wind erosion equation. *Soil Science Society Proceedings*. 602-608
- _____ C.R. FENSTER, W.W. HARRIS and M. LUNDQUIST, 1966. Stubble mulch tillage and planting in the Great Plains. *Transactions ASAE* 9:849-853
- _____ and D.V. ARMBRUST, 1968. A monthly climatic factor for the winderosion equation. *Journal of Soil and Water Cons.* 23(3): 103-104
- _____ L. LYLES, F.H. SIDDOWAY and D.W. FRYREAR, 1972. How to control winderosion. *Agr. Inf. Bull. US Dept. Agr. no. 354* (22 pp)
- _____ L. LYLES, J.D. DICKERSON and D.V. ARMBRUST, 1974. Using cattle feedlot manure to control wind erosion. *Journal of Soil and Water Cons.* 29(3):127-129

- W.W.Dr., 1979. Water naar Drente. Rapport van de Werkgroep Water-
voorziening Drenthe
- ZASLAVSKY, D., 1979. The prevention of winderosion in agriculture.
Nota 998. ICW, Wageningen
- ZENCHEL'SKY, S.T., A.C. DELANY and R.A. PICKETT, 1976. The organic
component of wind-blown aerosol as a function of wind
velocity. Soil Science 122(3):129-132
- ZGADZAY, L.K., 1977. Structuring of soils treated with modified
polyvinyl alcohol and its mechanism. Soviet Soil Science
9(2):219-224
- ZHIGAILOV, V.V. and L.A. GEFFEL, 1972. Study of the erodibility of
serozems by a field aerodynamic apparatus. Vestnik Sel-Khez
Nauki. Mosk. 10:127-133

BEGRIPPEN

ABRASIE	: Afslippen (-schuren), uiteenvallen van bodemdeeltjes door de impact van getransporteerd bodemmateriaal
ACCUMULATIE	: 'Verrijking' van een plek met getransporteerd bodemmateriaal dat zich aldaar ophoopt
AERODYNAMISCH	- glad: dikte laminaire laag > hoogte van oneffenheden ruw : dikte laminaire laag < hoogte van oneffenheden
AVALANCHING	: Uitwaaiëring bij winderosie: toenemend volume eroderend materiaal bij toenemende afgelegde afstand door abrasie
DEFLATIE	: Afname van bodemmateriaal door wegblazen abrasie leidend tot bodemdaling (creep, saltatie en suspensie)
DETRUSIE	: Abrasie van uitstekende delen
EFFLATIE	: Afname van fijn bodemmateriaal door uitblazen, welke fractie in suspensie wordt afgevoerd (stofstormen)
EFFLUXIE	: Afname van bodemmateriaal door de stuwdruk van de wind, waarbij het transport uitsluitend plaatsvindt in de vorm van saltatie (zandstormen)
EXTRUSIE	: Afname van grof bodemmateriaal door botsing en stuw- druk, waarbij het transport plaatsvindt in de vorm van kruipen/rollen (creep)
SEDIMENTATIE	: neerkomen en plaatselijk afzetten van geërodeerd materiaal als de voorbewegingskracht een bepaalde minimumgrens overschrijdt
WINDEROSIE	: Het proces van bodem losmaken en -transport in gang gebracht en gehouden door de kracht van de langsstrijkende wind
WINDEROSIE- GEVOELIGHEID	: Mate waarin de bodem gevoelig is voor winderosie (erodeerbaar is: wind-erodeerbaarheid) onder bepaalde gegeven omstandigheden

Bijlage II

GEBRUIKTE SYMBOLEN

a	(alleen verg. 5 blz. 27) 'ondergedompelde dichtheids'-ratio: $\frac{\rho_v - \rho_1}{\rho_1}$ (dimensieloos)
C_z	stofconcentratie op hoogte z [ML ⁻³] ; (mg/cu ft)
D, d	diameter van een bodemdeeltje of aggregaatje [L] (cm, mm)
D_e	Equivalent diameter van een bodemdeeltje of aggregaatje [L]; (cm, mm)
E	Bodemerosiegevoeligheid voor wind [ML ⁻²] ; (g/m ²)
η	Ratio van gemiddelde schuif- en liftkracht per oppervlakte-eenheid over het gehele oppervlakte en gemiddelde schuif- en liftkracht op de bovenste, door de wind bewogen deeltjes (pakkingsdichtheid maat) (dimensieloos)
ϕ	Hoek van ligging van een bodemdeeltje ten opzichte van het gemiddelde schuifspanning- aangrijpingspunt (graden ^o)
g	Versnelling van de zwaartekracht [LT ⁻²] (m/s ² , ft/s ²)
H	Hoogte van een barrière [L]
I	Bodemerosiegevoeligheid voor wind (winderodeerbaarheid) [ML ⁻² T ⁻¹], (tons/acre/annum; ton/ha/jaar) Potentieel gemiddeld jaarlijks bodemverlies van een onbeschermd veld van zekere afmetingen en onder bepaalde omstandigheden)
I_w	Bodemerosiegevoeligheidsindex (winderosie) gebaseerd op het gehalte aan deeltjes met een diameter > 0,84 mm (dimensieloos) ($I_w = I_2/I_1$, waarin I_1 de geërodeerde hoeveelheid onder zekere omstandigheden bij een gehalte van 60% en I_2 idem bij een ander gehalte)
K	Constante van Von Karman (= 0,4) [dimensieloos]
K_M	Moment-uitwisselingscoëfficiënt (zie ook bijlage IIb : ϵ_M) [dimensieloos]
L	Veldlengte [L] (m, ft)
q	Flux van bodemtransport [ML ⁻¹ T ⁻¹] , (t/l/t; g/m/s) (Gewicht van de hoeveelheid bodemmateriaal welke per eenheid van tijd een zekere breedte, bij onbeperkte hoogte, passeert)
ρ_1	Dichtheid van lucht [ML ⁻³] , (g/cc; kg/m ³) (Bij een temperatuur van 20°C : $\rho_1 = 1,20$ kg/m ³)
ρ_v	Dichtheid van vaste gronddeeltjes [ML ⁻³] ; (g/cc; kg/m ³)
ρ	'Ondergedompelde dichtheid' : $\rho = \rho_v - \rho_1$ [ML ⁻³] , (g/cc; kg/m ³)
T	Turbulentiefactor [dimensieloos] (Verhouding tussen maximum en gemiddelde schuif- en liftkracht op de bovenste gronddeeltjes aan het grondoppervlak)
$\bar{\tau}$	Gemiddelde wind-schuifspanning per oppervlakte eenheid [ML ⁻²] ; (dynes/sq. cm; N/m ²)
$\bar{\tau}_c$	Gemiddelde kritieke schuifspanning per oppervlakte-eenheid [ML ⁻²] , (dynes/sq. cm; N/m ²)
$u(z)$	Windsnelheid (op hoogte z) [LT ⁻¹] , (m/s)
u_d	Windsnelheid op hoogte z_0^1 boven een eroderend veld [LT ⁻¹] , (m/s)
u_s	Windsnelheid waarbij sedimentatie optreedt [LT ⁻¹] , (m/s)
u_*	Schuifsnijl van de wind boven een niet-eroderend veld [LT ⁻¹] , (m/s)
u_{*c}	Kritieke schuifsnijl van de wind boven een niet-eroderend veld [LT ⁻¹] , (m/s)
u_{*c}^1	Schuifsnijl van de wind boven een eroderend veld [LT ⁻¹] , (m/s)
X	Windtunnel-erosiegevoeligheid [ML ⁻²] , (g/m ²)
z	Hoogte boven het gemiddelde bodemoppervlak [L] , (cm, ft, m)
z_d	Verplaatsingshoogte van het gemiddeld aerodynamisch oppervlak [L] , (cm, ft, m). Vertikale verplaatsing van een windsnelheidsprofiel (-gradiënt) door vegetatie of andere verruwing
z_0	Hoogte boven het gemiddeld aerodynamisch oppervlak (niet eroderend), waar de windsnelheid nagenoeg gelijk aan nul is [L] , (cm, ft, m) (ruwheidsmaat)
z_0^1	Hoogte boven het gemiddeld aerodynamisch oppervlak (eroderend), waar de windsnelheid nagenoeg constant is. [L] , (cm, ft, m)

Bijlage II_b

OPMERKINGEN BIJ BIJLAGE II

AFWIJKENDE NOTATIES

- In plaats van K_M gebruikt EPPINK (1978) de coëfficiënt ϵ_m = kinematische wervel viscositeitscoëfficiënt;
in aansluiting op de kinematische viscositeitscoëfficiënt (ν) bij laminaire stroming.
Bij turbulente stroming is $\epsilon_m \gg \nu$, waardoor de laatste wordt verwaarloosd.
- Ook met betrekking tot het begrip ruwheid (nulniveau) worden verschillende notaties gehanteerd
CHEPIL en WOODRUFF (1963) gebruiken, in tegenstelling tot hetgeen in de meeste andere literatuur wordt aangetroffen, de factor k in plaats van z_o ; zo ook k^l in plaats van z_o^l . De hoogte van het nulniveau (aerodynamisch oppervlak) wordt bij hen aangegeven met z_o terwijl anderen (ook deze nota) de voorkeur geven aan de zogenaamde verplaatsingshoogte z_d (soms D_h)

Bijlage III

FREQUENTIEBEREKENING STUIFGEVOELIGHEID

Op basis van meteorologische gegevens van het weerstation Eelde is het aantal stuifgevoelige dagen (resp. uren) voor het veenkoloniale gebied bepaald, voor de maanden januari tot en met mei over de periode 1968 tot en met 1977 (10 jaar).

Gegevens:

1. Windsnelheid: hoogste uurgemiddelde per dag op 10 m hoogte (opgeven in halve m/s)
2. Windrichting: gemiddelde windrichting van de laatste 10 minuten van het desbetreffende uur in streken (32; 1968 t/m 1970) respectievelijk decigraden (36; 1971 t/m 1977)
3. Relatieve luchtvochtigheid: daggemiddelde (%)
4. Neerslag: daggemiddelde (mm * 0,1)
5. Verdamping: maandsom (1968 t/m 1970) respectievelijk decadesommen (1971 t/m 1977) in mm * 0,1
6. Straling: daggemiddelde in cal/cm^2 (1968 t/m 1970) respectievelijk J/cm^2 (1971 t/m 1977)
7. Bodemvochtgehalte (vol %) op 5 mm diepte, dat werd bepaald voor een Veenkoloniale grond, welke met de volgende parameters werd gekarakteriseerd:
 - vochtgehalte bij verzadiging: 60%
 - verzadigde doorlatendheid $k_0 = 1,5 \text{ cm/dag}$
 - doorlatendheid $k \approx 0$ bij een vochtgehalte kleiner dan 24%
 - draindiepte 100 cm
 - evenwichtsinstelling aan het begin van ieder jaar bij een constante neerwaartse stroming van 3 mm/dag; het vochtgehalte op 0,5 cm-mv. is dan $\pm 46\%$ ($\alpha = 0,03$)

De verdampingscijfers (5) zijn verdeeld over de dagen, met de stralingssommen als wegingsfactor. Met behulp van het analogon van WIND (1979) en de gegevens van neerslag (4), verdamping en bodemkarakteristieken werd een continubeeld van het vochtgehalte verkregen, waarvan per dag 5 waarden in het computergeheugen werden opgeslagen (0,0 - 4,8 - 9,6 - 14,4 - 19,2 uur).

Bij de bepaling van het aantal stuifgevoelige dagen (uren) werd vervolgens gebruik gemaakt van de windsnelheid (W), het vochtgehalte (V), neerslag minus verdamping (N-E) en de relatieve luchtvochtigheid (R.V.). Hoewel deze grootheden niet onafhankelijk van elkaar zijn, gelden zij als afzonderlijk criterium. (Indien bijvoorbeeld alleen vochtgehalte en windsnelheid randvoorwaarden zouden zijn, zou stuifgevaar kunnen optreden bij regen of hoge luchtvochtigheid, of andersom).

Tabel 1. Randvoorwaarden

W (m/s)	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-13.5	13.5-17.5	17.5-21.0	≥21.0
R.V. (%)	≤ 55	≤60	≤65	≤70	≤75	≤80	≤85	≤90
V (%)	≤ 24	≤25	≤27	≤30	≤33	≤34	≤35	≤35
N-E (mm/dag)	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0

Toetsing aan deze randvoorwaarden gaf een reeks erosiegevoelige dagen (uren) zoals in tabel 2 staat vermeld. Hierbij moet het volgende worden opgemerkt:

- voor het vochtgehalte werden 2 verschillende waarden gebruikt, hetgeen twee verschillende frequenties geeft (I en II). In het eerste geval werd als vochtgehalte de waarde op het derde tijdstip genomen (voor de dagelijkse verdamping), in het tweede geval de vierde waarde (tijdens of na de verdamping)
- voor de stormduur (aantal stuifgevoelige uren) werden bij de gevonden datum de windsnelheidsgegevens van de overige uren vergeleken met de andere criteria. Ingeval een bepaalde datum alleen aan II voldoet, geldt het aantal stuifgevoelige uren vanaf 12.00 uur. (Dat is dan ook de reden dat 72-3-11 niet werd meegerekend, zie tabel 2)
- het is duidelijk dat het predicaat 'erosiegevoelig' nog niet betekent dat er op die datum ook werkelijk sprake was van stuiven. Andere factoren zoals gewasbedekking (m.n. in mei) spelen hierbij een rol.

vervolg bijlage III

Tabel 2. Perioden van stuifgevaar

Jaar	Maand	Dag	Wind- snel- heid m/s	Wind- rich- ting	R.V. %	N mm	N-E mm	I			II			
								Vocht- geh.%	Storm- duur(u)	Uren p/jaar	Vocht- geh.%	Storm- duur(u)	Uren p/jaar	
68	3	19	12,5	WZW	73	-	-1,7	-	-	-	30,0	6	-	
68	3	20	13,0	ZW	70	0,2	-1,3	-	-	-	29,7	7	-	
68	3	27	10,0	WZW	70	-	-2,3	29,6	1	-	<24,0	1	-	
68	4	15	9,0	ZO	51	-	-3,3	<24,0	7	-	<24,0	7	-	
68	4	16	9,5	ZZO	51	-	-3,0	<24,0	7	-	<24,0	7	-	
68	4	19	10,0	WZW	70	-	-2,9	<24,0	1	16	<24,0	1	29	
69	3	8	11,0	WZW	75	-	-1,3	-	-	-	26,5	1	1	
70	5	12	11,0	NNO	72	-	-3,6	<24,0	2	2	<24,0	2	2	
71	3	10	14,0	NNW	74	0,2	-0,6	31,1	2	-	32,2	2	-	
71	4	23	9,0	O	56	-	-2,2	<24,0	6	-	<24,0	6	-	
71	4	29	10,0	NW	66	0,6	-2,5	<24,0	2	-	<24,0	2	-	
71	5	1	8,5	NO	51	-	-4,1	<24,0	10	-	<24,0	10	-	
71	5	2	8,0	NNO	59	-	-4,1	<24,0	2	-	<24,0	2	-	
71	5	3	8,0	NNO	54	-	-4,0	<24,0	2	-	<24,0	2	-	
71	5	7	7,0	ZO	52	-	-3,1	<24,0	5	29	<24,0	5	29	
72	3	11	12,5	NO	69	0,3	-0,9	-	-	-	32,0	-	-	
72	3	27	14,0	W	80	1,0	-0,1	27,3	1	-	27,2	1	-	
72	4	24	10,0	NNO	62	-	-3,5	-	-	-	<24,0	6	-	
72	5	25	11,5	W	75	2,1	-1,4	-	-	-	27,6	3	-	
72	5	26	14,0	WZW	74	1,0	-2,4	29,7	14	15	<24,0	14	24	
74	5	16	8,0	O	60	-	-4,5	24,7	2	2	<24,0	2	2	
75	5	5	11,0	NO	63	-	-4,0	-	-	-	<24,0	8	-	
75	5	6	11,5	NO	64	-	-3,7	31,1	9	9	<24,0	9	17	
76	3	12	9,5	O	55	-	-1,1	-	-	-	26,5	3	-	
76	3	30	11,5	W	73	0,6	-1,1	32,3	4	-	27,1	4	-	
76	4	5	13,5	WZW	70	-	-2,0	30,5	8	-	<24,0	10	-	
76	4	6	11,5	WZW	73	-	-1,0	26,8	3	-	<24,0	3	-	
76	4	22	10,5	NNO	66	-	-2,5	<24,0	3	-	<24,0	3	-	
76	4	24	11,0	NNO	69	-	-2,9	<24,0	8	-	<24,0	8	-	
76	4	25	10,5	NNO	69	-	-3,3	<24,0	3	-	<24,0	3	-	
76	4	27	9,5	N	65	-	-2,0	<24,0	4	-	<24,0	4	-	
76	5	10	10,0	NW	65	-	-2,7	<24,0	2	35	<24,0	2	40	
77	5	19	9,0	NO	60	-	-4,2	-	-	-	<24,0	6	-	
77	5	20	11,0	NO	63	-	-2,9	26,7	18	-	<24,0	18	-	
77	5	26	8,0	O	55	-	-4,3	<24,0	10	28	<24,0	10	34	
Totaal aantal stuifdagen, resp. stuifuren									26	136	136	34	178	178

In de figuren 1 t/m 4 zijn de gegevens uit de tabel nog op andere wijze weergegeven. Gezien de beperkte omvang van de beschouwde periode is extrapolatie van de overschrijdingskansen, hier slechts met een stippellijn aangegeven, onbetrouwbaar.

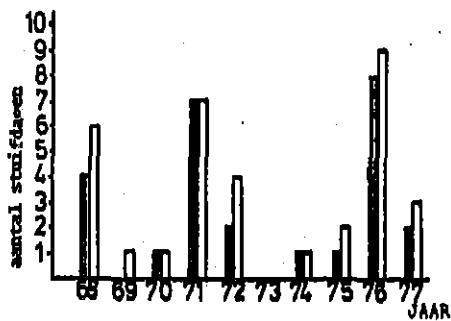


Fig. 1 : aantal stuifdagen per jaar

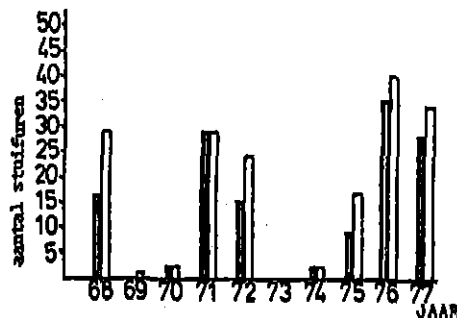


Fig. 2 : aantal stuifuren per jaar

I : gearceerd
II : blank

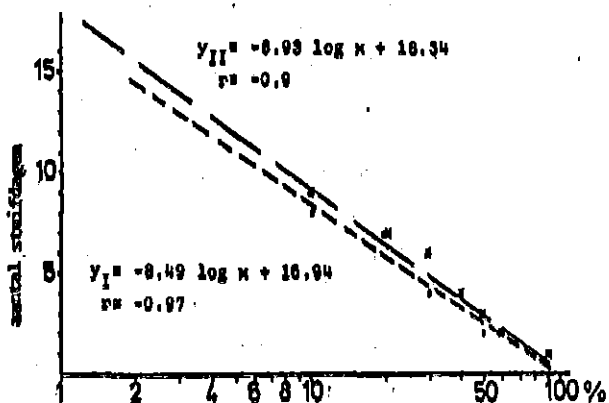


Fig 3 : overschrijdingskans aantal stuifdagen per jaar

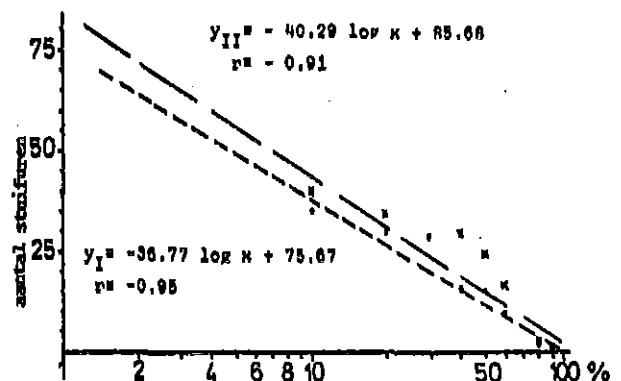


Fig 4 : overschrijdingskans aantal stuifuren per jaar

I : —————
II : - - - - -