32/uub (364.1) 2 ex.

Erosienormeringsonderzoek Zuid-Limburg

BIBLIOTHEEK STARINGGEBOUW

Veld- en simulatiestudie

A.P.J. de Roo (red.)
P.M. van Dijk
C.J. Ritsema
N.H.D.T. Cremers
J. Stolte
K. Oostindie
R.J.E. Offermans
F.J.P.M. Kwaad
M.A. Verzandvoort

Rapport 364.1

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1995

15 JAN. 1996

ivl 0106973

REFERAAT

Roo, A.P.J. de (red.), P.M. van Dijk, C.J. Ritsema, N.H.D.T. Cremers, J. Stolte, K. Oostindie, R.J.E. Offermans, F.J.P.M. Kwaad, M.A. Verzandvoort, 1995. *Erosienormeringsonderzoek Zuid-Limburg; veld- en simulatiestudie.* Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 364.1. 235 blz.; 10 fig.; 10 tab.; 86 ref.; 5 aanh.

Het doel van het erosienormeringsonderzoek was een toetsingskader op te stellen waarin de bestemmings-, beheers- en inrichtingsaspecten kunnen worden beoordeeld. Hiertoe is een veld- en simulatiestudie verricht. De veldstudie bevatte metingen op perceels-, helling- en stroomgebiedniveau. De simulatiestudie resulteerde in een fysisch-deterministisch en hydrologisch erosiemodel (LISEM: Limburg Soil Erosion Model), waarmee diverse scenario's zijn doorgerekend. De veldstudie gaf een integraal beeld van het mechanisme van water- en sedimentafvoer in de lössgebieden van Zuid-Limburg. De resultaten van het LISEM-model zijn redelijk betrouwbaar. Uit de simulaties bleek dat een combinatie van beheers- en inrichtingsmaatregelen de beste resultaten oplevert.

Trefwoorden: beheersmaatregel, inrichtingsmaatregel, lössgebied, scenario, sedimentafvoer, simulatiemodel, waterafvoer

ISSN 0927-4499

Tevens verschenen als publikatie bij de Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht (november 1994).

©1995 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Project 6168 [RAP364-1.EVR / 11 / 95]

Inhoud

blz.

Woord vooraf 15

1 Inleiding 17
1.1 Erosie- en wateroverlast in Zuid-Limburg 17
1.2 Doelstelling van het erosienormeringsprojekt 17
1.3 Onderzoeksaanpak 17
1.4 Ligging en representativiteit van de proefgebieden 19
1.4.1 Keuze van de hoofdstroomgebieden 19
1.4.2 Keuze van de substroomgebieden 19
1.4.3 Representativiteit 19
1.5 Opbouw van het rapport 23

2 Meetopzet 25
2.1 Inleiding 25
2.2 Metingen op stroomgebiedsniveau 25
2.3 Metingen op substroomgebiedsniveau 27
2.3.1 Meetlocaties 27
2.3.2 Afvoermetingen 27
2.3.3 Neerslagmetingen 28
2.3.4 Sedimentconcentraties 28
2.3.5 Gegevensverwerking 28
2.4 Metingen op hellingniveau 29
2.4.1 Drukhoogtemeting 29
2.4.2 Bodemfysische karakteristieken 31
2.5 Metingen ten behoeve van onderzoek naar de effecten van maatregelen 32
2.6 Ontwikkeling van het LISEM-model 33

3 Beschrijving van de stroomgebieden 35
3.1 Inleiding 35
3.2 Oppervlakte en reliëf 35
3.3 Bodems 37
3.3.1 Bodemgeografisch onderzoek 37
3.3.2 Korrelgrootte van de bodems 39
3.3.3 Bodemfysische schematisatie 41
3.3.4 Hellingprofielen 48
3.4 Landgebruik 49
3.4.1 Oppervlakte 49
3.4.2 Verhard wegoppervlak 53
3.4.3 Wielsporen 53
3.4.4 De bedekkingsgraad 54
3.4.5 De gewashoogte 55
3.4.6 De leaf area index 55
3.5 De bodemruwheid 56
3.6 De schuifweerstand 58
3.7 Aggregaatstabiliteit 59
3.8 Erosieverschijnselen en verslemping 61

4 Neerslag, water- en sedimentafvoer 65

4.1 Inleiding 65
4.2 Een erosiegebeurtenis in detail 66
4.3 Metingen in het stroomgebied Catsop 68
4.3.1 Hoofdstroomgebied Catsop 69
4.3.2 Substroomgebied 1, Catsop 71
4.3.3 Substroomgebied 2, Catsop 71
4.4 Metingen in het stroomgebied St. Gillisstraat 72
4.4.1 Hoofdstroomgebied, St. Gillisstraat 73
4.4.2 Substroomgebied 1, St. Gillisstraat 74
4.4.3 Substroomgebied 2, St. Gillisstraat 75
4.5 Metingen in het stroomgebied Etzenrade 77
4.5.1 Hoofdstroomgebied, Etzenrade 78
4.5.2 Substroomgebied 1, Etzenrade 78
4.5.3 Substroomgebied 2, Etzenrade 79
4.6 Conclusies 80

5 Maatregelen ter beperking van bodemerosie en wateroverlast 83
5.1 Inleiding 83
5.2 Erosiebeperkende teeltsystemen op proefveldniveau 83
5.2.1 Inleiding 83
5.2.2 Meetmethoden 85
5.2.3 Erosiebeperking in de winter bij maïsteeltsystemen 86
5.2.4 Erosiebeperking in de zomer bij maïsteeltsystemen 86
5.2.5 Erosiebeperking in de zomer bij bietenteeltsystemen 89
5.2.6 Kenmerken van het gewas en het bodemoppervlak 89
5.2.7 Conclusies 93
5.3 Erosiemetingen op demonstratiepercelen 94
5.3.1 Inleiding 94
5.3.2 Meetmethoden 94
5.3.3 Groeiseizoen 1992 95
5.3.4 Winter 1992/1993 99
5.3.5 Groeiseizoen 1993 99
5.3.6 Vergelijking resultaten demonstratieproject/proefveldonderzoek 101
5.3.7 Conclusies 103
5.4 Water- en sedimentinvang door groenstroken 104
5.4.1 Inleiding 104
5.4.2 Literatuurgegevens 104
5.4.3 Meetmethoden en meetlocaties 109
5.4.4 Resultaten 112
5.4.5 Conclusies 117

6 Synthese 119
6.1 Inleiding 119
6.2 Bodemfysische metingen 119
6.3 Metingen op (sub)stroomgebiedsniveau 120
6.4 Metingen naar effecten teeltsystemen en groenstroken 122

7 Het LISEM-model 123

7.1 Inleiding 123
7.2 De invoer van het LISEM-model 125
7.2.1 Neerslag file 125
7.2.2 Tabellen voor het bodemwater-model 125
7.2.3 Kaarten van de relevante topografische, bodem en landgebruiksvariabelen 126
7.2.4 Het commandobestand 128
7.3 Een voorbeeld van de code binnen het LISEM-model 128
7.4 De gesimuleerde processen per gridcel 129
7.4.1 Inleiding 129
7.4.2 Neerslag 131
7.4.3 Interceptie 131
7.4.4 Berekening van waterstroming door de bodem 132
7.4.5 Berging in micro-depressies 135
7.4.6 Oppervlakkige afstroming en stroming door een stroomgeul 137
7.4.7 Het losmaken van bodemdeeltjes door spaterosie 137
7.4.8 Transportcapaciteit 138
7.4.9 Rill en interrill erosie 138
7.4.10 Tractorsporen, verharde wegen en korstvorming 139
7.4.11 Groenstroken en grasbanen 140
7.5 De uitvoer van het LISEM-model 140
7.6 Gevoeligheidsanalyse 141
7.7 Conclusies 146

8 Resultaten van het LISEM-model 149
8.1 Inleiding 149
8.2 Calibratie van het helling hydrologie model 149
8.2.1.Twee-dimensionale aanpak 149
8.2.2. Eén-dimensionale versus twee-dimensionale aanpak 161
8.3 Validatie van het stroomgebiedsmodel LISEM 161
8.3.1 Validatie procedure 161
8.3.2 Test runs en calibratie 166
8.3.3 Validatie runs 167
8.3.4. Oorzaken van verschillen tussen gemeten en gesimuleerde waarden 172
8.3.5. Meerwaarde van het LISEM-model 173
8.3.6. Validatie resultaten sediment 174
8.4 Vergelijking van het LISEM- met het LID-model 175
8.5 Conclusies 176

9 Scenario's ter beperking van bodemerosie en wateroverlast 179
9.1 Inleiding 179
9.2 Overzicht van de scenario's 179
9.3 Uitgangspunten voor scenarioberekeningen 182

10 Resultaten scenarioberekeningen 189
10.1 Inleiding 189
10.2 Resultaten 189
10.3 Conclusies 203

11 Conclusies en aanbevelingen 205

Literatuur 213

Aanhangsels 221

Tabellen

2.1 Monsterdieptes voor de bodemfysische schematisatie en omrekening drukhoogte in watergehalte. Niet vermeld zijn de standaard dieptes bij iedere drukhoogtekast van 0, 6, 16 en 36 cm - maaiveld. Weergegeven dieptes zijn bovenkant monsters in cm - maaiveld; monsters 8 cm hoog; alle monsters in duplo. 31
2.2 Overzicht van onderwerp en tijdstip bemonstering bodemoppervlak (1993) ten behoeve van de bodemfysiche schematisatie van de stroomgebieden. Voor zover mogelijk zijn de monsters in duplo gestoken 32
3.1 Hellingklassen (in procent van totale oppervlakte) 35
3.2 Onderverdeling van de hoogste niveaus van de bodemtypen van de drie stroomgebieden met de absolute en procentuele bijdrage aan de totale oppervlakte (naar Leenders, 1994). 38
3.3 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemklassen in het stroomgebied Catsop 40
3.4 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemeenheden in het stroomgebied St. Gillisstraat 40
3.5 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemeenheden in het stroomgebied Etzenrade 40
3.6 Gemeten textuur van de verschillende bodem horizonten van de vier hellingen 47
3.7 Landgebruik winter 1991/92 (in procent van totale oppervlakte) 49
3.8 Landgebruik zomer 1992 (in procent van totale oppervlakte) 49
3.9 Representativiteit landgebruik (bron CBS 1992) 53
3.10 Hoeveelheid en aard van wielsporen in verschillende percelen in 1992 53
3.11 Gestandaardiseerde bedekkingsgraden afhankelijk van gewassoort en tijdstip 55
3.12 Extinctie coëfficiënten voor verschillende gewassen 56
3.13 Gestandaardiseerde RR-indices in cm 57
3.14 Gestandaardiseerde schuifweerstand*, afhankelijk van tijdsperiode bodemtype en landgebruik 59
3.15 Gestandaardiseerde waarde van de aggregaatstabiliteit 60
3.16 Erosieverschijnselen in de proefgebieden 61
4.1 Oppervlaktes van de substroomgebieden en geteelde gewassen op de percelen gedurende 1992 en 1993 65
4.2 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied Catsop 70
4.3 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied Catsop 70
4.4 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, Catsop 72
4.5 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, Catsop 72

4.6 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied St. Gillisstraat 73
4.7 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied St. Gillisstraat 73
4.8 Afvoerregistraties in substroomgebied 1, St. Gillisstraat 74
4.9 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 1, St. Gillisstraat 75
4.10 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, St. Gillisstraat 76
4.11 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, St. Gillisstraat 76
4.12 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied Etzenrade 77
4.13 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied Etzenrade 78
4.14 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, Etzenrade 79
4.15 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, Etzenrade 79
5.1 Beschrijving van de teeltsystemen op de maïsproefvelden 84
5.2 Beschrijving van de teeltsystemen op de bietenproefvelden 84
5.3 Gemiddelde waarden voor vegetatiebedekking op maïsteeltsystemen in de winterperiode[1] 90
5.4 Gemiddelde waarden voor vegetatiebedekking op maïsteeltsystemen in de zomerperiode[1] 90
5.5 Gemiddelde waarden van bodem- en oppervlaktekenmerken van maïsteeltsystemen in de winterperiode 91
5.6 Verloop van de porositeit voor de teeltsystemen gedurende de winterperiode 91
5.7 Gemiddelde waarden van bodem- en oppervlaktekenmerken van maïsteeltsystemen in de zomerperiode 92
5.8 Correlatiecoëfficiënten tussen gewas- en bodemparameters en waterafvoer, spaterosie en de sedimentconcentratie gebaseerd op metingen tijdens 18 regensimulaties. De significanties van de correlaties staan tussen haakjes 93
5.9 Gegevens van de erosiebeperkende teeltsystemen op de demonstratiepercelen, en hellinggegevens. (Perceelcodering is gelijk aan die van Jaarverslag 1992 van Proefboerderij Wijnandsrade, Hoofdstuk 3) 95
5.10 Resultaten perceel 4, groeiseizoen '92. 96
5.11 Resultaten perceel 5, groeiseizoen '92 97
5.12 Resultaten perceel 11, groeiseizoen '92 97
5.13 Resultaten perceel 13, groeiseizoen '92 98
5.14 Resultaten perceel 15, groeiseizoen '92. 98
5.15 Resultaten van erosiemetingen gedurende de winterperiode bij verschillende bodembedekkers op een viertal locaties 99
5.16 Gegevens van de erosiebeperkende teeltsystemen en hellinggegevens op de demonstratiepercelen. (De perceelscodes: Jaarverslag Proefboederij Wijnandsrade 1993) 100
5.17 Resultaten perceel 1, groeiseizoen '93 101
5.18 Resultaten perceel 3, groeiseizoen '93 101
5.19 Resultaten percelen 2, 10 en 11, groeiseizoen '93 101
5.20 Waterafvoer en bodemverlies op de meetlocaties met directzaai 102
5.21 Reducties van waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door directzaai en mulchzaai zoals gemeten op erosieproefvelden 102
5.22 Waterafvoer en bodemverlies op de locaties met mulchzaai 103
5.23 De gemiddelde sedimentconcentratie van uitstromend water bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal

tussen haakjes is het aantal experimenten. Per experiment zijn 6 tot 12 sedimentmonsters per strook genomen 113
5.24 Geoptimaliseerde parameters van vergelijking 5.1 voor de schatting van de sedimentconcentratie als functie van de strookbreedte en de instroomconcentratie. Tussen haakjes staan de standard errors van de geschatte parameters vermeld 114
5.25 De range in wateruitstroom uitgedrukt als percentage van de instroom bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal tussen haakjes is het aantal waarnemingen 115
5.26 De range in sedimentafvoer uitgedrukt als percentage van de instroom bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal tussen haakjes is het aantal waarnemingen 116
7.1 Profieltypen voor verschillend landgebruik gedurende het jaar 127
7.2 k-θ-h-relaties voor maïsakkers in de zomer 127
7.5 Voorbeeld van een standaard LISEM uitvoer tekstbestand 141
7.6 Gevoeligheidsanalyse van het LISEM-model in het stroomgebied Catsop. Weergegeven zijn de afwijkingen van de totale afvoer, de piekafvoer en het gemiddelde bodemverlies, als gevolg van variaties van plus of min 20% van een model-variabele 144
8.1 Testresultaten van simulatie runs in het stroomgebied St. Gillisstraat met variabele initiële drukhoogte 166
8.2 Validatie-resultaten van de afvoer van de belangrijkste buien. De McCuen's coëfficiënt geeft de correlatie aan tussen alle gemeten en gesimuleerde waterafvoeren van de hydrograaf 170
8.3 Validatie-resultaten van de sedimentconcentratie 174
8.4 Vergelijking van het LID-afvoermodel en het LISEM-model. Voor het LISEM-model is scenario 0 in de zomer als uitgangsituatie genomen 176
9.1 Buikarakterisitieken voor de scenario's 183
9.2 Modelparameters voor het berekenen van de scenario's 184
9.3 De totale lengte en oppervlakte van groenstroken en grasbanen. 186
10.1 'Off-site' effecten van de scenario's in de stroomgebieden: Reductiepercentages t.o.v. scenario 1, het huidige beleid 190
10.2 'On-site' effecten van de scenario's in de stroomgebieden: de oppervlakten met extreme netto erosie of sedimentatie. Reductiepercentages t.o.v. scenario 1, het huidige beleid 190
10.3 Totale effecten van de scenario's in het stroomgebied Catsop 194
10.4 Totale effecten van de scenario's St. Gillisstraat 195
10.5 Totale effecten van de scenario's Etzenrade. 196
10.6 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied Catsop 197
10.7 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied St. Gillisstraat 199
10.8 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied Etzenrade 200

Figuren

1.1 Ligging van de onderzoeksgebieden in Zuid-Limburg 18
1.2 Ligging van het proefgebied Catsop (gemeente Stein) 20
1.3 Ligging van het proefgebied Etzenrade (gemeente Onderbanken) 21
1.4 Ligging van het proefgebied St. Gillisstraat (gemeente Voerendaal) 22

2.1 Constructie van tensiometers voor het meten van drukhoogten in de bodem. Voor dieper dan 5 cm - mv. is tensiometer A gebruikt en voor 2,5 en 5 cm - mv. tensiometer B. Maten in mm 29
2.2 Overzicht van een meetopstelling voor de meting van hellinghydrologie. De tensiometers zijn ongeveer 50 cm van de drukhoogtekast geplaatst. Maten in cm - mv 30
3.1 Hellingklassekaart van het stroomgebied Catsop 36
3.2 Hellingklassekaart van het stroomgebied St. Gillisstraat 36
3.3 Hellingklassekaart van het stroomgebied Etzenrade 37
3.4 Verdeling bodemtypen in Zuid-Limburg ten opzichte van de verdeling bodemtypen in de stroomgebieden. De gegevens van Zuid-Limburg zijn afkomstig van de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, blad 61-62 west en oost (Vleeshouwer en Damoiseaux, 1990) 39
3.5 Resultaat van RETC fit-procedure toegepast op een monster gestoken op 16 cm diepte in de helling Catsop. De gemeten punten zijn resultaten van de verdampingsmethode volgens Wind. De parameters beschrijven de lijnen volgens Mualem-Van Genuchten vergelijkingen 43
3.6 Karakteristieken van buien waarmee karakteristieke profielen en, voor de tweejaarlijke buien, individuele monsters zijn doorgerekend met het computermodel SWMS_2D 43
3.7 Karakteristieke profielen van de bodemtypen voorkomend in de drie stroomgebieden. A = rade- en bergbrikgronden; B= berbrikgronden met colluviaal dek; C = polder- en ooivaaggronden; D = oude kleigronden; E = polder- en ooivaaggronden met kleefaarde in ondergrond 45
3.8 Afvoerberekening van de individuele monsters gestoken in briklagen voor een tweejaarlijkse winterbui. De intiële drukhoogte is gesteld op -100 cm en de dikte van de doorgerekende laag op 10 cm 45
3.9 Afvoerpercentages voor de vijf karakteristieke profielen met dezelfde bovengrond en minimum, gemiddelde en maximum karakteristiek voor de verschillende lagen van de ondergrond voor vier buien 46
3.10 Gemeten afvoer versus berekende neerslagoverschot voor een aantal proefvelden van de proefboerdrij Wijandsrade. De metingen hebben plaatsgevonden op maïsvelden van 23 t/m 25 juni 1993 en zijn uitgevoerd met een regensimulator. Voor de berekening zijn de fysische karakteristieken van de ondergrond van het profiel gelijk gehouden (vanaf 10 cm-mv) en zijn voor de bovengrond de gemiddelde karakteristieken per teeltsysteem gebruikt. Het vochtgehalte van de bovenste 5 cm is gemeten en als invoer voor de berekening gebruikt 48
3.11 Landgebruik in het proefgebied Catsop 50
3.12 Landgebruik in het proefgebied Etzenrade, zomer 1992 51
3.13 Landgebruik in het proefgebied St. Gillisstraat, zomer 1992 52
3.14 Erosieverschijnselen in het proefgebied Catsop 62
3.15 Erosieverschijnselen in het proefgebied St. Gillisstraat 63
3.16 Erosieverschijnselen in het proefgebied Etzenrade 64
4.1 Drukhoogteprofielen op drie tijdstippen van de helling St. Gillisstraat (substroomgebied 2) tijdens de bui van 5 juli 1992. Het eerste tijdstip (15.00 uur) is bij aanvang bui en het laatste tijdstip (18.20 uur) is kort na aanvang van de afvoer bij het uitstroompunt van het substroomgebied als gevolg van een tweede bui. De resultaten zijn metingen met behulp van

drie drukhoogtekasten. Bij de kast onderaan de helling waren geen gegevens van 2,5 cm - mv beschikbaar. 67
4.2 Het verloop van de neerslagintensiteit en waterafvoer (a) en van de sedimentconcentratie (linker y-as) en de sedimentafvoer (rechter y-as) in de tijd (b) tijdens een bui op 5 juli 1992 in substroomgebied 2, St. Gillisstraat 68
4.3 Het verloop van de neerslagintensiteit en water- en sedimentafvoer in de tijd tijdens een bui op 5 juli 1992 in het hoofdstroomgebied St. Gillisstraat 69
5.1 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende teeltsystemen (tabel 5.1) door natuurlijke neerslag gedurende de winterperiode, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem (cultivator = 1). De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer 86
5.2 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende maïsteeltsystemen (tabel 5.1) gedurende het groeiseizoen, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem. De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer. a. resultaten bij natuurlijke neerslag; b. bij gesimuleerde neerslag 87
5.3 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende bietenteeltsystemen (tabel 5.2) door gesimuleerde neerslag gedurende het groeiseizoen, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem. De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer 89
5.4 Een schematisch profiel van grasbarrières op een helling in verschillende stadia van ontwikkeling (naar Kemper et al., 1992) 105
5.5 Bovenaanzicht van de meetopstelling (toelichting: zie tekst) 110
5.6 Het verloop van het debiet (a) en de sedimentconcentratie (b) tijdens een veldproef bij twee verschillende strookbreedtes (5 en 10 m) en bij afwezigheid van een strook (0 m, ofwel het instromend water) 112
5.7 Boxplots van gemeten sedimentconcentraties van de afvoer bij vier grasstrookbreedtes op een locatie met jong grasland met intensief beheer (a), en een locatie met oud grasland met extensief beheer (b). In deze plots is het volgende weergegeven: de mediaan, de 25 en 75 percentilewaarden (de box), de meetrange met uitzondering van de 'outliers' welke als afzonderlijke punten zijn aangegeven 114
5.8 a. de relatie tussen gemeten en met vergelijking 5.1 berekende sedimentconcentraties; b. resultaten van met vergelijking 5.1 berekende uitstroomconcentraties als functie van de grasstrookbreedte bij drie verschillende instroomsedimentconcentraties (ci) 115
5.9 Boxplots van gemeten waterafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij vier grasstrookbreedtes voor relatief jong grasland (a) en oud grasland (b) 116
5.10 Boxplots van gemeten sedimentafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij vier grasstrookbreedtes op jong intensief gebruikt (a) en oud extensief gebruikt grasland (b) 117
5.11 Boxplot van gemeten sedimentafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij verschillende hellingshoeken (gegevens van jong intensief gebruikt grasland) 118
7.1 Stroomschema van het LISEM-model. 130
7.2. Aanroep van subroutines in water transport module van het LISEM-model 134

7.3. Korte beschrijving van de subroutines in de water transport module van het LISEM-model 135
7.4 Een voorbeeld van de afvoerverlooplijnen van een bui-simulatie 140
7.5 Een voorbeeld van een kaart van over de oppervlakte afstromend water 142
7.6 Een voorbeeld van een bodemverlieskaart. 143
7.7 De gevoeligheid van de gesimuleerde totale afvoer voor enkele invoervariabelen 145
7.8 De gevoeligheid van de gesimuleerde piekafvoer voor enkele invoervariabelen 145
7.9 De gevoeligheid van de uitvoer het LISEM-model voor enkele invoervariabelen met betrekking tot het bodemverlies 146
8.1. Het geschematiseerde dwarsprofiel en het gebruikte rekengrid voor de vier hellingen: (a) helling boomgaard Ransdaal/St. Gillisstraat, (b) helling maïs Ransdaal/St. Gillisstraat, (c) helling Etzenrade, (d) helling Catsop 150
8.2a Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'boomgaard' in het stroomgebied St. Gillisstraat, tijdens een regenbui op 20 juni 1992 153
8.2b Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'maïs' in het stroomgebied St. Gillisstraat, tijdens een regenbui op 5 juni 1992 154
8.2c Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn)voor de helling 'bieten' in het stroomgebied Etzenrade, tijdens een regenbui op 5 juni 1992 155
8.2d Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'aardappelen' in het stroomgebied Catsop, tijdens een regenbui op 28-30 mei juni 1993. 156
8.3a Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'boomgaard' in het stroomgebied St. Gillisstraat (Ransdaal) 157
8.3b Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'maïs' in het stroomgebied St. Gillisstraat (Ransdaal) 158
8.3c Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'bieten' in het stroomgebied Etzenrade 159
8.3d Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'aardappelen' in het stroomgebied Catsop 160
8.4a Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling 'boomgaard', St. Gillisstraat. 162
8.4b Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling 'maïs', St. Gillisstraat 163
8.4c Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling Etzenrade 164
8.4d Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling Catsop 165
8.5 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied Catsop 167
8.6 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied St. Gillisstraat 168
8.7 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied Etzenrade 169

8.8 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde piekafvoeren van enkele buien 171
8.9 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde gemiddelde afvoeren van buien 171
8.10 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde sedimentconcentraties van buien 175
9.1 Ligging grasbanen en groenstroken in de stroomgebieden 187
10.1 Totale afvoer (m3) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 191
10.2 Totale afvoer (m3) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 191
10.3 Piek afvoer (l/s) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 192
10.4 Piek afvoer (l/s) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 192
10.5 Bodemverlies (kg/ha) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 193
10.6 Bodemverlies (kg/ha) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat 193

Aanhangsels

1 Erosiereductie winterperiode 1991/1992 en 1992/1993 (natuurlijke neerslag) 223
2 Erosiereductie maïsteeltsystemen in groeiseizoenen 1992 en 1993 225
3 Erosiereductie bietenteeltsystemen in groeiseizoen 1992 227
4 Overzicht van de meetgegevens van het grasstrokenonderzoek. 229
5 Het landgebruik per proefgebied per scenario (0, 1 en 2) 231

Woord vooraf

Door een gezamenlijke inspanning van DLO-Staring Centrum te Wageningen en de universiteiten van Utrecht en Amsterdam is het voorliggende onderzoek tot stand gekomen.

Het onderzoek richtte zich op het bepalen van de effectiviteit en inpasbaarheid van een aantal maatregelen welke dienen om de problematiek van de wateroverlast en bodemerosie verder terug te dringen.

Financiering vond plaats door de Provincie Limburg, het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, het Waterschap Roer en Overmaas, en de gemeenten Eijsden, Gulpen, Maastricht, Margraten, Meerssen, Nuth, Onderbanken, Schinnen, Simpelveld, Stein, Vaals, Valkenburg, Voerendaal en Wittem.

De begeleiding van het onderzoek vond plaats door de werkgroep erosienormering, samengesteld uit vertegenwoordigers van de financierende instanties.

Het onderzoek is uitgevoerd tussen november 1991 en mei 1994 en is als volgt uitgevoerd:
— DLO-Staring Centrum te Wageningen heeft het bodemfysisch onderzoek op hellingniveau verricht en een bodemfysisch sub-model ontwikkeld;
— de Universiteit van Amsterdam heeft onderzoek uitgevoerd in de substroomgebieden en heeft metingen verricht naar de effecten van teeltsystemen en groenstroken;
— de Universiteit Utrecht heeft onderzoek uitgevoerd op stroomgebiedsniveau, heeft het nieuwe LISEM-model ontwikkeld, waarin het bodemfysische sub-model van DLO-Staring Centrum is opgenomen en heeft vervolgens met dit model diverse scenario's doorgerekend. Utrecht voerde tevens de coördinatie van het onderzoek.

Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht
Heidelberglaan 2, Postbus 80.115, 3508 TC Utrecht, tel.: 030-2532749
Dr. A.P.J. de Roo (coördinator)
Drs. N.H.D.T. Cremers
Drs. R.J.E. Offermans
Drs. M.A. Verzandvoort
Ing. C.G. Wesseling

Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam
Nieuwe Prinsengracht 130, 1018 VZ Amsterdam, tel.: 020-5257451
Drs. F.J.P.M. Kwaad
Drs. P.M. van Dijk
Dr. A.C. Imeson

DLO-Staring Centrum, Wageningen
Marijkeweg 11. Postbus 125, 6700 AC Wageningen, tel.: 0317-474200
Drs. C.J. Ritsema
Ing. J. Stolte
Dr.Ir. J.J.B. Bronswijk
W. Leenders
Ing. K. Oostindie

1 Inleiding

1.1 Erosie- en wateroverlast in Zuid-Limburg

Bodemerosie en wateroverlast zijn milieuproblemen die zich voordoen in het heuvelland van Zuid-Limburg. Tijdens hevige buien spoelt een deel van de neerslag over de oppervlakte af. Dit water voert op zijn weg naar het dal bodemdeeltjes mee. De problematiek van erosie heeft aandacht gekregen in het provinciale milieubeleid (Milieubeleidsplan Limburg 1991-1994) omdat:

— er nog geen effectief rijksbeleid voor erosie is;
— een groot deel van Zuid-Limburg gevoelig is voor erosie en het verschijnsel ook daadwerkelijk veelvuldig voorkomt;
— erosie en de gevolgen daarvan schade veroorzaken (wateroverlast, bodemverlies, wegspoelen van zaaigoed, gewassen, meststoffen en bestrijdingsmiddelen).

In de afgelopen jaren zijn er diverse onderzoeken uitgevoerd naar de oorzaken en gevolgen van de optredende processen (Schouten et al, 1985; Bouten et al, 1985; Van Eijsden & Imeson, 1985; Kwaad, 1991; Kwaad & Van Mulligen, 1991; De Roo, 1991; De Roo & Riezebos, 1992; De Roo, 1993). Echter, er is gebleken dat er leemtes in de kennis van de optredende processen aanwezig waren om tot een voldoende onderbouwd beleid te komen. Om deze leemtes te vullen is er, zoals aangeduid in de nota 'erosienormering in Zuid-Limburg', als uitwerking van het Streekplan Zuid-Limburg, een onderzoek uitgevoerd naar de oplossingsrichtingen van de problematiek van bodemerosie en wateroverlast: het 'erosienormeringsonderzoek'.

1.2 Doelstelling van het erosienormeringsprojekt

De hoofddoelstelling van het erosienormeringsonderzoek is het opstellen van een toetsingskader waarin de bestemmings-, beheers- en inrichtingsaspecten van de door de betrokken gemeenten, Waterschap en in het kader van de landinrichting te ontwerpen bodem- en waterconserveringsplannen kunnen worden beoordeeld. Tevens is onderzoek verricht om aan te kunnen geven waar welke maatregelen genomen dienen te worden om de nadelige effecten van bodemerosie en wateroverlast tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen.

1.3 Onderzoeksaanpak

Het onderzoek is opgebouwd uit een veldstudie en een simulatiestudie. De veldstudie is verricht in drie proefgebieden (figuur 1.1). Behalve in deze proefgebieden is er veld-onderzoek verricht op de zogenaamde 'demo'-velden en op de proefplots bij de Proefboerderij Wijnandsrade. Binnen dit deelonderzoek zijn de effecten van een

aantal teeltechnische en natuurtechnische maatregelen onderzocht. Omdat de gevolgen van bodemerosie en wateroverlast zich globaal gezien op een drietal schaalniveaus in het landschap manifesteren is er ook op deze drie schaalniveaus onderzoek verricht:

a) het perceelsniveau, waarop met name de effecten van het wegspoelen van bodemdeeltjes, zaaigoed, gewassen, meststoffen en bestrijdingsmiddelen van belang zijn;
b) het hellingniveau waarop naast bovengenoemde zaken ook de effecten van slibafzetting in de lager gelegen delen van het landschap en de inspoeling van met slib en meststoffen belast water in natuurgebieden een rol spelen;
c) het stroomgebiedsniveau waarop naast genoemde effecten met name de water- en modderoverlast in de bebouwde kommen en de versnelde oeverafslag in de waterlopen kenmerkend zijn.

De simulatiestudie is opgedeeld in de ontwikkeling van een nieuw fysisch deterministisch hydrologisch en erosiemodel LISEM (LImburg Soil Erosion Model) waarmee vervolgens simulaties zijn uitgevoerd waarbinnen diverse scenario's zijn doorgerekend. De mogelijke oplossingsrichtingen van de problematiek die als scenario's in diverse combinaties doorgerekend zijn, zijn:

— cultuurtechnische maatregelen: bufferbassins;
— teelttechnische maatregelen: mulchzaai, directzaai, groenbemesters, bodembedekkers;
— natuurtechnische maatregelen: grasbanen en groenstroken.

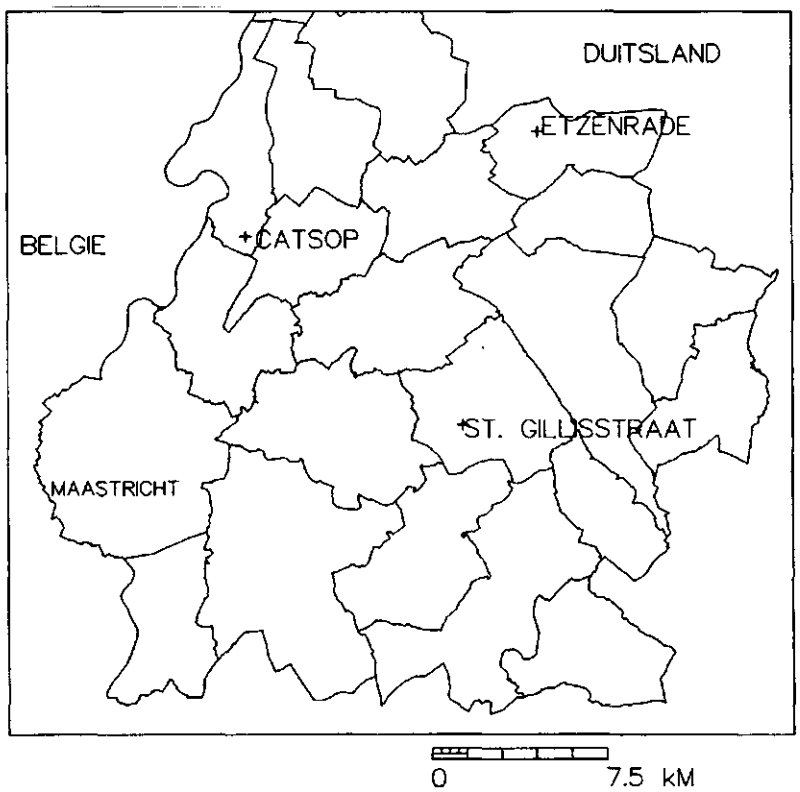


Fig. 1.1 Ligging van de onderzoeksgebieden in Zuid-Limburg

1.4 Ligging en representativiteit van de proefgebieden

1.4.1 Keuze van de hoofdstroomgebieden

Ten behoeve van het projekt erosienormering is naast de reeds gemonitorde stroomgebieden Catsop (gemeente Stein; voorheen metingen Landbouwuniversiteit Wageningen en LNV Roermond; figuur 1.2) en Etzenrade (gemeente Onderbanken; metingen Waterschap Roer en Overmaas) (figuur 1.3) door de opdrachtnemers het stroomgebied St. Gillisstraat (nabij Ransdaal, gemeente Voerendaal) (figuur 1.4) geselekteerd. De argumenten die een rol hebben gespeeld bij de keuze voor dit laatste gebied zijn:

— afvoer en erosie zijn hier een bekend probleem (mei-bui 1987); het stroomgebied ligt in het Ransdalerveld;
— topografie, bodem en landgebruik zijn typerend voor een limburgs stroomgebied;
— er zijn geen elementen in dit gebied aanwezig die het onderzoek nadelig kunnen beïnvloeden of bemoeilijken;
— het meetpunt ligt nabij een regenwaterbuffer van het Waterschap Roer en Overmaas;
— de grond waar het meetpunt was gepland is in eigendom van het Waterschap;
— de goede bereikbaarheid van het hoofdmeetpunt.

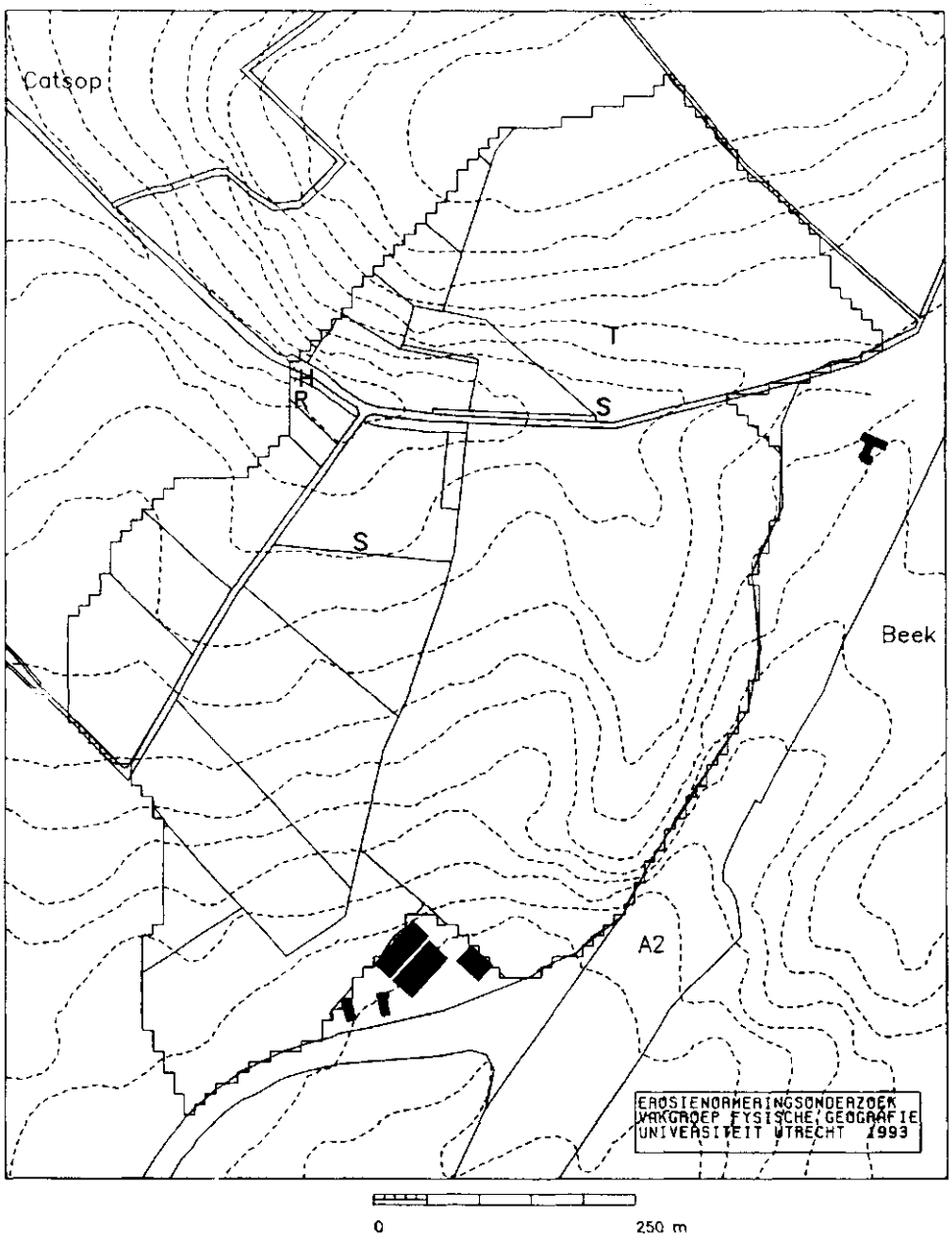
1.4.2 Keuze van de substroomgebieden

In de drie hoofdstroomgebieden zijn zes sub-stroomgebieden geselekteerd. Op de zes uitstroompunten van deze substroomgebieden zijn metingen van water- en sediment-afvoer verricht. In vier van de zes substroomgebieden is bodemfysisch onderzoek verricht ter bestudering van de waterbeweging in de bodem. De deelstroomgebieden zijn zo gekozen, dat al het afstromende water in het deelstroomgebied met minimale middelen naar het meetpunt kan worden geleid, en dat het gebied duidelijk begrensd is.

1.4.3 Representativiteit

De hellingpercentages van de drie proefgebieden kunnen als redelijk representatief voor Zuid-Limburg worden beschouwd. In Etzenrade overheersen de flauwere hellingen, in St. Gillisstraat (Ransdaal) de wat steilere (zie hoofdstuk 3.2).

In de drie stroomgebieden komen alle löss bodemtypen van Zuid-Limburg voor. De percentages radebrik-, bergbrik-, ooivaag-, en kalkverweringsgronden zijn hoger ten opzichte van het Zuid-Limburgs gemiddelde, de percentages poldervaaggronden, stenige gronden en groeves zijn onder vertegenwoordigd. De belangrijkste bodem die ontbreekt is rivierklei. Dit bodemtype ligt in de beekdalen en is voor erosieonderzoek derhalve minder interessant. Na vergelijking met alle bodems in



H : meetgoot Hoofdstroomgebied

S : meetgoot Substroomgebied

T : hellingtransect Tensiometers

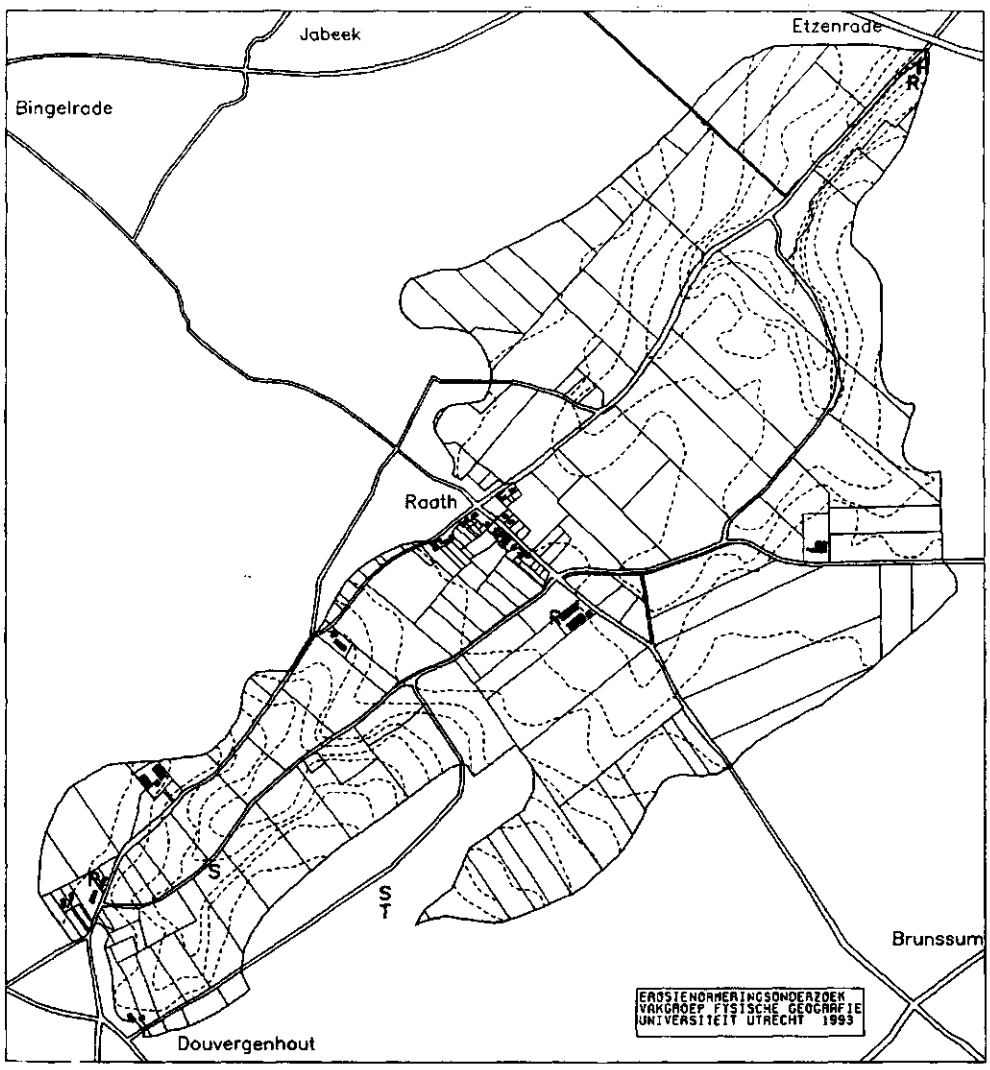
R : Regenmeter

hoogtelijn (2.5 m)

gebouw

weg

Fig. 1.2 Ligging van het proefgebied Catsop (gemeente Stein)



H : meetgoot Hoofdstroomgebied

S : meetgoot Substroomgebied

T : hellingtransect Tensiometers

R : Regenmeter

hoogtelijn (2.5 m)

gebouw

weg

Fig. 1.3 Ligging van het proefgebied Etzenrade (gemeente Onderbanken)

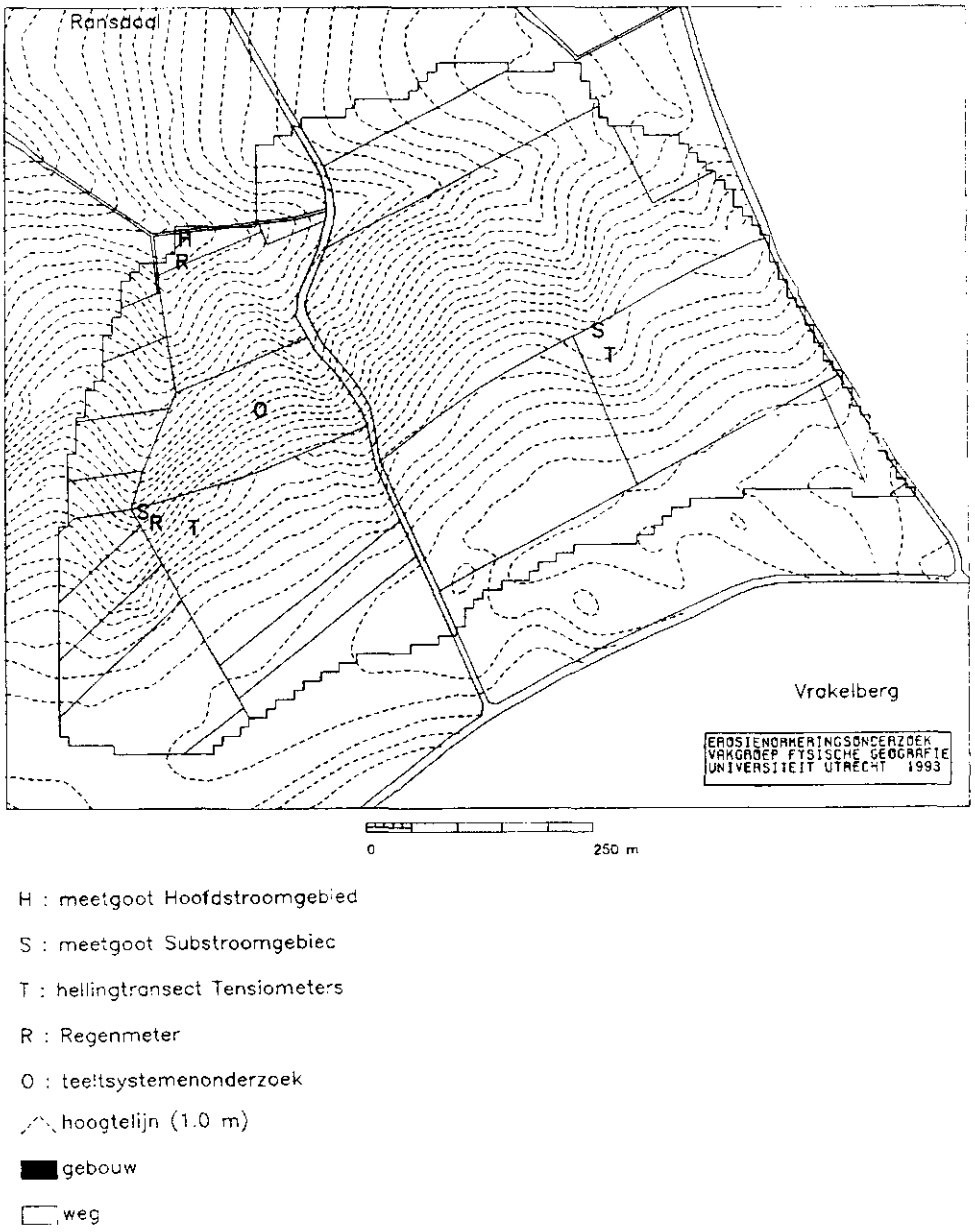


Fig. 1.4 Ligging van het proefgebied St. Gillisstraat (gemeente Voerendaal)

Zuid-Limburg (hoofdstuk 3.3.1) is geconcludeerd dat de bodems representatief zijn voor heel Zuid-Limburg.

Het landgebruik is eveneens representatief voor heel Zuid-Limburg (hoofdstuk 3.4.1) met als uitzonderingen het proefgebied Catsop, waar relatief weinig maïs verbouwd wordt, en het proefgebied St. Gillisstraat, waar een relatief groot deel van het stroomgebied in gebruik is als laagstamboomgaard.

1.5 Opbouw van het rapport

Na deze inleiding wordt in hoofdstuk 2 de meetopzet besproken. Hierin komen alle metingen op helling-, substroomgebieds- en stroomgebiedsniveau aan de orde. Hoofdstuk 3 bevat beschrijvingen van de drie proefgebieden. Relief, bodems, bodemfysische schematisatie, landgebruik, erosieverschijnselen en overige belangrijke variabelen worden besproken. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de bodemfysische metingen en de neerslag-, afvoer- en sediment-metingen op stroomgebieds- en substroomgebiedsniveau besproken. Ook komt de onderlinge samenhang in de vorm van een synthese aan de orde. Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van de veld-onderzoeken naar de effekten van teeltechnische en natuurtechnische maatregelen op de bodemerosie en wateroverlast. In hoofdstuk 6 wordt een synthese van alle metingen gegeven. Hoofdstuk 7 geeft een beschrijving van het nieuw ontwikkelde LISEM-model. In hoofdstuk 8 komt de validatie en calibratie daarvan aan de orde. Hoofdstuk 9 geeft een beschrijving van de doorgerekende scenario's. In hoofdstuk 10 komen vervolgens de resultaten van deze scenarioberekeningen met LISEM aan de orde. Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Meetopzet

2.1 Inleiding

In het kader van het erosienormeringsonderzoek is onderzoek uitgevoerd op vier schaalniveau's: het proefveldniveau (20 m), het hellingtransect (100-200 m.), het substroomgebied (2-10 ha.) en het hoofdstroomgebied (40-220 ha.). De metingen die verricht zijn in de drie proefgebieden, kunnen in twee categorieën verdeeld worden: metingen ten behoeve van de model-invoer en om de oorzaken van de problematiek te kunnen onderzoeken, en metingen om het model te kunnen valideren en de omvang van de problematiek te inventariseren.

Naast bovenstaande metingen in de proefgebieden is er elders op diverse locaties in Zuid-Limburg onderzoek uitgevoerd naar de effecten van diverse teeltsystemen en groenstroken.

Eveneens is gebruik gemaakt van de resultaten van het onderzoek naar erosiebestrijdende teeltsystemen aan de proefboerderij Wijnandsrade.

2.2 Metingen op stroomgebiedsniveau

Ten behoeve van de monitoring en de validatie van het LISEM-model is in de hoofdstroomgebieden continu neerslag en waterafvoer gemeten. Daarnaast zijn bij hoge afvoeren watermonsters ter bepaling van de sedimentconcentratie genomen. Na belangrijke buien zijn tevens de waargenomen erosie-verschijnselen gekarteerd.

Ten behoeve van de invoer van het LISEM-model en het onderzoek naar de oorzaken van de problematiek zijn in de stroomgebieden de volgende variabelen gemeten:
— neerslag (continu);
— hellingshoek;
— % verhard oppervlak;
— % wielsporen;
— bodemtype;
— textuur, organische stofgehalte en pH;
— verslempingsgraad (enkele malen per jaar);
— bodemfysische eigenschappen van de bodemtypen (K-h-θ) relaties;
— aggregaatstabiliteit (enkele malen per jaar);
— schuifweerstand (enkele malen per jaar);
— landgebruik (enkele malen per jaar);
— bedekkingsgraad en gewashoogte (enkele malen per jaar);
— bodemruwheid (enkele malen per jaar);

In de drie hoofdstroomgebieden zijn continu registrerende meetopstellingen ingericht die bestaan uit de volgende apparatuur:

Catsop:
- — een Parshall meetgoot.
- — twee Tipping Bucket Neerslagmeters met een interval van 0.1 mm per tip.
- — een Ott drukopnemer ter bepaling van de waterhoogte.
- — een ISCO monsternemer voor het nemen van watermonsters.
- — een Campbell datalogger voor het opslaan van de gegevens.

Etzenrade:
- — een Venturi meetgoot (Waterschap).
- — een ultrasonore meter ter bepaling van de waterhoogte (Waterschap).
- — drie tipping bucket neerslagmeters (Etzenrade en Douvergenhout (Watershap) en Raath).
- — een Campbell datalogger bij de regenmeter in Raath.

St. Gillisstraat:
- — een Venturi meetgoot
- — twee Tipping Bucket Neerslagmeters met een interval van 0.1 mm per tip.
- — een Ott drukopnemer ter bepaling van de waterhoogte.
- — een ISCO monsternemer voor het nemen van watermonsters.
- — een Campbell datalogger voor het opslaan van de gegevens.

In het stroomgebied Catsop zijn de gegevens van neerslag, waterafvoer en sedimentgehaltes verzameld vanaf 1 februari 1992. Gegevens van 1987 t/m 1992 waren tevens beschikbaar. In het stroomgebied St. Gillisstraat zijn de metingen op 9 april 1992 gestart. De dataverzameling in het stroomgebied Etzenrade, die in 1987 gestart is door het Waterschap Roer en Overmaas, is gecontinueerd. Er is een extra regenmeter in het stroomgebied Etzenrade geplaatst nabij Raath (figuur 1.3). De gegevens zijn verwerkt tot de voor het LISEM-model benodigde gegevens: cumulatieve neerslag, neerslag intensiteit, totale kinetische energie van de neerslag, afvoer, cumulatieve afvoer en piekafvoer. De gegevens van de regenbuien die benodigd zijn voor validatie van het LISEM-model zijn weergegeven in tabellen.

In de meetgoot bij Catsop (type Parshall) is een betrouwbaar debiet te meten bij een waterhoogte tussen 4.6 cm en 76 cm (Bos, 1989). Deze hoogten komen overeen met een debiet tussen 12.0 en 945 liter per seconde. De afwijking van het debiet ten opzichte van de werkelijke waarden bedraagt bij het bovenstaande meetbereik maximaal 3 procent (Bos, 1989). Bij een waterhoogte kleiner dan 4.6 cm zal deze afwijking aanzienlijk toenemen. De meetfout veroorzaakt door de druksensor, die in het laboratorium bepaald is, blijkt kleiner dan 1 promille te zijn. De cumulatieve afvoer is in de tabellen weergegeven in twee delen:
- — waterhoogte 0.5 cm tot 4.6 cm (0.5 cm waterhoogte is gelijk aan de onderzijde van de 'stilling well' dat de verbinding van de druksensor met de meetgoot vormt).
- — waterhoogte 4.6 tot 76 cm.

De meetgoten te Etzenrade en St. Gillisstraat zijn beide van het type Khafagi-Venturi. Bij een waterhoogte groter dan 5 cm is de afwijking van het debiet kleiner dan 10 procent. Het betrouwbare meetbereik van de Venturi-meetgoten komt dan overeen met een debiet van 12.9 tot en met 1750 liter per seconde (Etzenrade 1520 l/s). De afwijking van het debiet neemt toe naarmate de waterhoogte kleiner wordt. De

gemiddelde fout in het meetbereik kleiner dan 5 cm zal ongeveer 50% bedragen. De meetfout veroorzaakt door de druksensor in St. Gillisstraat is gelijk aan die in Catsop. In Etzenrade treedt een geringe meetfout op als gevolg van de ultrasone registratie. Ten behoeve van de cumulatieve afvoer wordt in St. Gillisstraat een tweedeling gemaakt:

— waterhoogte 1.3 tot 5.0 cm (1.3 cm waterhoogte is gelijk aan de onderzijde van de 'stilling well' dat de verbinding van de druksensor en de meetgoot vormt).
— waterhoogte 5.0 tot 132 cm (Etzenrade tot 120 cm).

In het stroomgebied Etzenrade wordt cumulatieve afvoer berekend voor alle debieten met een waterhoogte groter of gelijk aan 5.0 cm. Als gevolg van de ultrasone registratie is een waterhoogte kleiner dan 2.5 cm niet duidelijk te onderscheiden. Monsters voor het bepalen van de sedimentconcentratie zijn alleen genomen bij afvoeren groter dan 25 l/s (Catsop), 50 l/s (Etzenrade) en 25 l/s (St. Gillisstraat).

2.3 Metingen op substroomgebiedsniveau

2.3.1 Meetlocaties

Binnen elk van de drie hoofdstroomgebieden zijn twee substroomgebieden geselecteerd voor neerslag- en afvoermetingen. De begrenzingen hiervan zijn aangegeven in figuren 1.2 t/m 1.4. De substroomgebieden zijn zo gekozen, dat het afstromende water met minimale middelen naar het meetpunt kan worden geleid, en dat het gebied duidelijk begrensd is. De oppervlaktes van de substroomgebieden zijn berekend uit de digitale terreinmodellen van de proefgebieden, met behulp van het pakket Watershed (Van Deursen & Kwadijk, 1990) en gecontroleerd in het veld.

2.3.2 Afvoermetingen

In de substroomgebieden wordt het water door een zogenaamde H-flume geleid. Daar waar ter plaatse van de meetgoot te weinig hoogteverschil is, zijn watergeleidingsschotten geplaatst om de capaciteit van de meetgoot zoveel mogelijk te benutten en om te voorkomen dat water langs de meetgoot stroomt. Een belangrijk punt is de keuze van de meetgootcapaciteit. Gekozen is voor een ontwerpbui met een intensiteit van 60 mm/uur. Bij een aangenomen afvoerpercentage van 35% levert deze bui, in een stroomgebied met een oppervlakte van 5 ha, een evenwichtsdebiet op van circa 300 l/s. Op basis hiervan is gekozen voor een H-flume met een meetbereik van 0.5 tot 309 l/s (61 cm waterhoogte).

De waterdruk in de meetgoot wordt gemeten met een drukopnemer en geregistreerd met een datalogger (merk Campbell, type CR10). De gebruikte drukopnemer (merk Trans Instruments) heeft een meetonnauwkeurigheid van 0.1% van het meetbereik (1.5 m waterdruk). Daar komt een temperatuurafhankelijkheid van 0.015% per °C bij (gerekend vanaf 10 °C). Bij een watertemperatuur die 6 °C hoger of lager is dan

10 °C is de maximale meetfout iets minder dan 3 mm waterhoogte. De gemeten waterhoogte wordt met behulp van een calibratievergelijking (Bos, 1989) omgerekend naar het debiet. Bij waterhoogtes beneden 2.4 cm (ongeveer 0.5 l/s) neemt de fout in de schatting van het bijbehorende debiet snel toe (Bos, 1989). Daarom is bij de verwerking van de waterhoogtemetingen een onderverdeling gemaakt in cumulatieve afvoer beneden en boven 2.4 cm.

Het belangrijkste probleem bij de afvoerregistraties wordt veroorzaakt door sedimentatie van bodemmateriaal in de meetgoot. Hierdoor wordt het debiet overschat. Deze fout kan belangrijk zijn bij lage debieten. Daarbij kan het bodemmateriaal de verbinding met de drukopnemer verstoppen. Ook vorst verstoort de druk-waarnemingen.

2.3.3 Neerslagmetingen

Neerslag is gemeten met zogenaamde 'tipping bucket' regenmeters (merk Casella). In één substroomgebied is gebruik gemaakt van een regenmeter die iedere 0.1 mm neerslag registreert, in de overige substroomgebieden is een ander type gebruikt (merk Rain-o-matic) dat per mm neerslag registreert. Deze laatste regenmeter is in het laboratorium gecalibreerd en blijkt betrouwbare meetgegevens te verschaffen. De gemeten neerslag is eveneens geregistreerd met een datalogger (merk Campbell).

2.3.4 Sedimentconcentraties

In de substroomgebieden zijn watermonsters verzameld met behulp van automatische monsternemers (merk ISCO). Zodra de waterhoogte in de meetgoot een bepaalde waarde overschrijdt (> 5 cm), stuurt de datalogger dit apparaat aan en wordt er 500 ml water uit de meetgoot gepompt. Hiervan wordt de sedimentconcentratie bepaald.

2.3.5 Gegevensverwerking

De metingen zijn verwerkt tot de volgende gegevens: cumulatieve neerslag, neerslagintensiteit, maximale 5-minuten neerslagintensiteit, kinetische energie van de neerslag, herhalingstijden van de neerslag, afvoer, cumulatieve afvoer en piekafvoer. Door combinatie van de afvoer- en sedimentconcentratiecurves, en integratie in de tijd is op buibasis de totale afvoer van water en sediment berekend.

2.4 Metingen op hellingniveau

2.4.1 Drukhoogtemeting

Een gedetailleerde kennis van de hellinghydrologie is vereist om de erosieproblematiek te kunnen doorgronden en te simuleren met een computermodel. Het LISEM-model vereist als invoer het initiële bodemvochtgehalte bij aanvang van een bui. Ten behoeve van de validatie van het LISEM-model is het initiële bodemvochtgehalte bij iedere bui tijdens de meetperiode vastgesteld en is het verloop van het vochtgehalte tijdens en na de bui gevolgd. Het bodemvochtgehalte is indirekt bepaald door de drukhoogte van de bodem te meten. De drukhoogte is een maat voor het bodemvochtgehalte. Omrekening van drukhoogte naar bodemvochtgehalte wordt met de waterretentiekarakteristiek uitgevoerd. De drukhoogte is gemeten met behulp van tensiometers (Bakker, 1975; Stolte et al., 1992), aangesloten op een batterijgevoede meet en registratie eenheid (Van den Elsen & Bakker, 1992). Deze meet en registratie eenheid ('drukhoogtekast') bestond uit een datalogger (merk Tattle; type 4A) en twaalf drukopnemers (merk Micro Switch; type 141PC15D; meetbereik 0 tot -1000 cm waterkolom). Daarnaast zijn regenmeters op de drukhoogtekast aangesloten. De tensiometers bestonden uit keramische cups, voorzien van twee koperleidingen voor aansluiten op drukopnemer en doorspoelen van de cup (figuur 2.1).

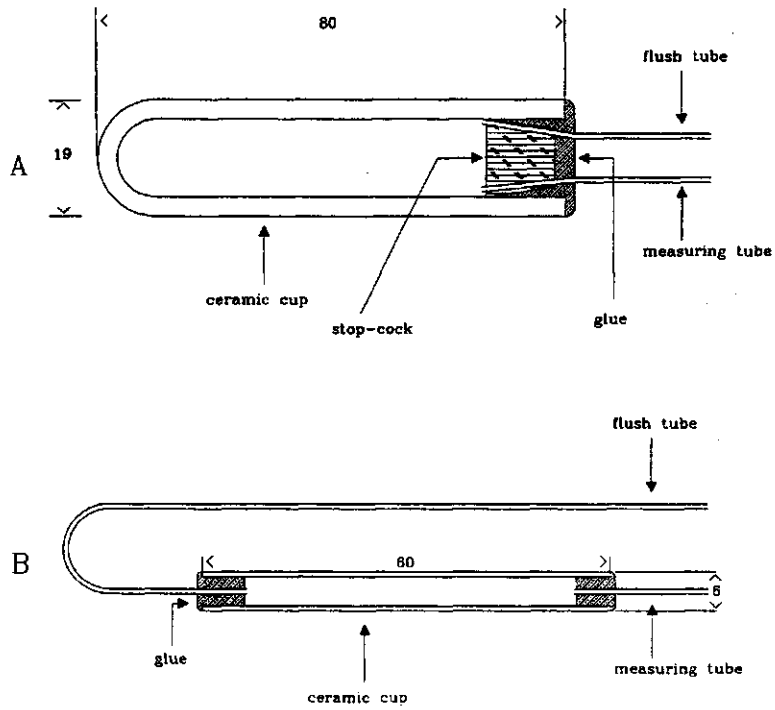


Fig. 2.1 Constructie van tensiometers voor het meten van drukhoogten in de bodem. Voor dieper dan 5 cm - mv. is tensiometer A gebruikt en voor 2,5 en 5 cm - mv. tensiometer B. Maten in mm

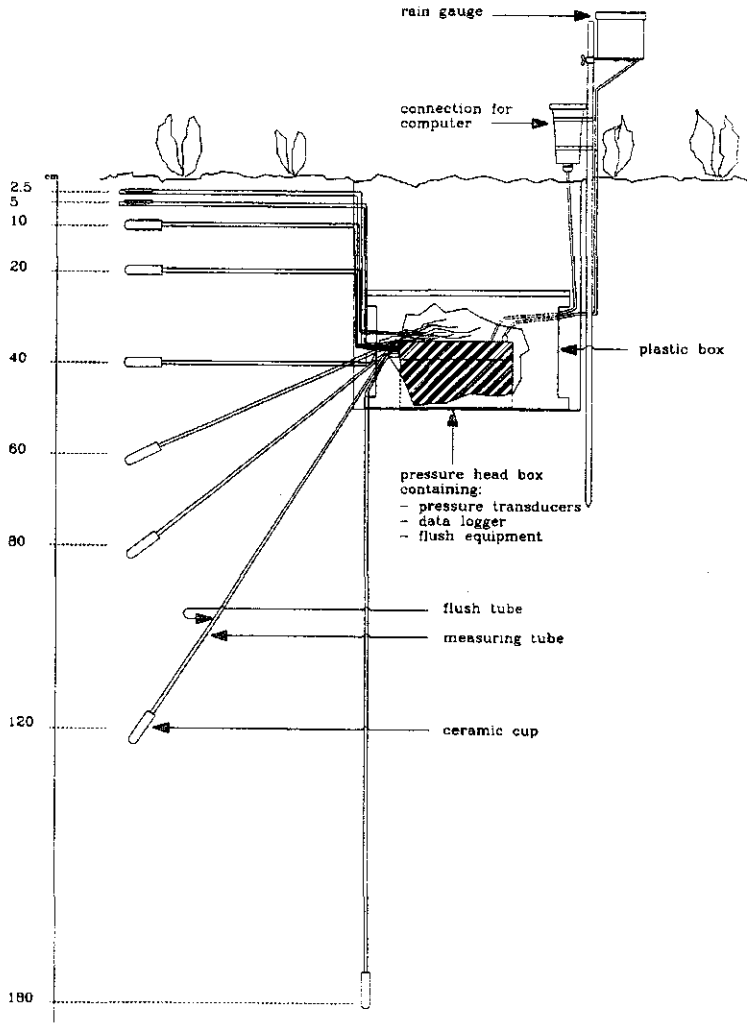


Fig. 2.2 Overzicht van een meetopstelling voor de meting van hellinghydrologie. De tensiometers zijn ongeveer 50 cm van de drukhoogtekast geplaatst. Maten in cm - mv

In totaal zijn op vier hellingen drukhoogtekasten geïnstalleerd. Per helling zijn drie kasten geplaatst: boven; midden en onderaan de helling. De kasten werden ongeveer 50 cm diep in de grond geplaatst en per kast zijn 10 (1992) respectievelijk 11 (1993) tensiometers geïnstalleerd. De dieptes waarop de tensiometers geplaatst zijn, zijn: 2,5 cm (2 stuks); 5 (2 stuks); 10; 20; 40; 60; 80; 120; en vanaf 1993 180 cm - maaiveld (figuur 2.2).

De nauwkeurigheid van de drukopnemers is 0.4% van de volle schaal. Daarnaast zijn de drukopnemers temperatuur gevoelig en introduceert de bepaling van de diepte van de tensiometers ten opzichte van de drukopnemers een fout, waardoor de totale nauwkeurigheid van de drukhoogtemeting uitkomt op ongeveer ± 5 cm. Dit resulteert in maximaal afwijking van 0,5% van het watergehalte.

Tijdens droge perioden werd ieder uur een meting uitgevoerd. Op het moment dat de aangesloten regenmeter een puls afgaf, werd de meetfrequentie opgevoerd naar

één keer per vijf minuten (in 1993 naar één keer per tien minuten, omdat bij deze frequentie bij nadere beschouwing dezelfde piekmetingen werden geregistreerd). De lengte van het versnelde meetregime was afhankelijk van de hoeveelheid pulsen, afgegeven door de regenmeter, en varieerde van minimaal tien keer na de laatste puls tot maximaal 100 keer na de laatste puls. Dit resulteerde bij de gebruikte opstelling in een bezoek van éénmaal per twee à drie weken, afhankelijk van het weer, om overschrijving van het geheugen te voorkomen.

2.4.2 Bodemfysische karakteristieken

Om de gemeten drukhoogte om te kunnen zetten in een vochtgehalte van de bodem is een waterretentiekarakteristiek nodig. Daarnaast is de doorlatendheidskarakteristiek nodig om modelberekeningen mogelijk te maken. Deze bodemfysische karakteristieken zijn gemeten met behulp van de verdampingsmethode volgens Wind (Wind, 1968; Boels et al., 1978; Halbertsma & Veerman, submitted) De verzadigde doorlatendheid is gemeten met de constant-head methode (Klute, 1986; Stolte et al., 1992). Op elke tensiometer-diepte is een monster, 8 cm hoog 10 cm diameter, gestoken met behulp van een hydraulische pers (Stolte et al., 1992). Dit werd bij iedere drukhoogtekast op diepten van 0, 6, 16 en 36 cm - maaiveld in duplo uitgevoerd. Diepere lagen werden op één plaats in de helling gestoken, zodanig dat iedere voorkomende bodemlaag bemonsterd werd (tabel 2.1).

Tabel 2.1 Monsterdieptes voor de bodemfysische schematisatie en omrekening drukhoogte in watergehalte. Niet vermeld zijn de standaard dieptes bij iedere drukhoogtekast van 0, 6, 16 en 36 cm - maaiveld. Weergegeven dieptes zijn bovenkant monsters in cm - maaiveld; monsters 8 cm hoog; alle monsters in duplo.

Catsop	St. Gillisstr Boomgaard	St. Gillisstr Maïs		Etzenrade
boven, midden & onderaan helling	midden helling	onderaan helling	bij uitstroom punt substroom gebied	midden helling
56	56	26	40	56
82	76	56		76
	80			90

Laboratoriummetingen van het bodemoppervlak zijn verricht bij verschillende teeltsystemen en condities van het bodemoppervlak gedurende het seizoen. Deze gegevens zijn gebruikt voor de bodemfysische schematisatie van de stroomgebieden. De bemonstering heeft zowel op praktijkpercelen als proefvelden met verschillende teeltsystemen plaatsgevonden en is in 1993 uitgevoerd. Voor locatie en detail informatie zie Arends, 1993. Een overzicht van deze bemonsteringsstrategie is in tabel 2.2 te zien.

Tabel 2.2 Overzicht van onderwerp en tijdstip bemonstering bodemoppervlak (1993) ten behoeve van de bodemfysiche schematisatie van de stroomgebieden. Voor zover mogelijk zijn de monsters in duplo gestoken

teeltsystemen:	bemonsteringsdata
zonder zaaibedbereiding	30-3; 4-5
paraflug	4-5
met zaaibedbereiding	4-5
direct zaai	30-3; 4-5
stro	30-3; 4-5
praktijk	30-3; 4-5
graslanden:	
jong gras, geen begrazing	28-5
oud gras, koeien	28-5
jong gras, koeien	15-6
oud gras, koeien	15-6
oud gras, geen begrazing	15-6
condities bodemoppervlak:	
maïs, korst	15-4
maïs, scheur	15-4
maïs, wielspoor	16-6
maïs, buiten wielspoor	4-5; 16-6
tarwe, korst	15-4; 4-5; 28-5
tarwe, scheur	15-4; 4-5; 28-5
tarwe, wielspoor	28-5
suikerbieten, wielspoor	16-6
suikerbieten, buiten wielspoor	4-5; 16-6

2.5 Metingen ten behoeve van onderzoek naar de effecten van maatregelen

Erosie en wateroverlast kan onder andere worden tegengegaan door het toepassen van teeltmethoden die waterafvoer en bodemverlies beperken. Dit zijn maatregelen die zich richten op een verbetering van het agrarisch beheer van de gronden. Daarnaast kunnen structurele maatregelen in de ruimtelijke inrichting worden gerealiseerd, zoals de aanleg van regenwaterbuffers, de aanleg van grasbanen in droogdalbodems of het aanleggen van groenstroken die de hoogtelijnen volgen. Deze maatregelen richten zich op verbetering van de ruimtelijke inrichting van een gebied.

Binnen het erosienormeringsonderzoek zijn deelonderzoeken uitgevoerd naar de effecten van maatregelen op erosie en wateroverlast:
— een onderzoek naar de effecten van teelttechnische maatregelen op proefveldniveau;
— een onderzoek waarbij de effecten van een aantal teeltsystemen, die op proefveldniveau zijn getest, worden geverifieerd op perceelsniveau;
— een onderzoek naar de mogelijkheden van water- en sedimentinvang door groenstroken.

Voor het proefveldonderzoek naar erosiebeperkende teeltsystemen is gebruik gemaakt van gegevens die zijn verzameld door de Universiteit van Amsterdam en de Proefboerderij Wijnandsrade. Dit betreft gegevens van water- en sedimentafvoer van proefveldjes met verschillende teeltsystemen bij natuurlijke en gesimuleerde neerslag. Ook is gebruik gemaakt van een aantal metingen aan het gewas en gewasresten en bodemoppervlakte-kenmerken. In het kader van het Erosienormeringsonderzoek zijn op de proefvelden aanvullende metingen verricht ten behoeve van invoer van parameters voor het LISEM-model. Met behulp van deze parameters is het mogelijk om teelttechnische maatregelen, toegepast in een stroomgebied, door te rekenen op hun effecten voor erosie en waterafvoer.

De Dienst Landbouwvoorlichting (DLV) heeft een aantal Zuid-Limburgse boeren bereid gevonden een aantal teeltmaatregelen op hun percelen toe te passen in het kader van het zogeheten Demonstratieproject Erosiebeperking op Bedrijfsniveau. Op enkele van deze percelen zijn ten behoeve het Erosienormeringsonderzoek erosiemetingen verricht ter verificatie van de bevindingen van het teeltsystemenonderzoek.

De sediment- en waterinvang door groenstroken is op experimentele wijze onderzocht op twee bestaande graslandlocaties met verschillend beheer. De gebruikte methoden worden in hoofdstuk 5 per deelonderzoek nader toegelicht.

2.6 Ontwikkeling van het LISEM-model

Naast de metingen in het veld en in het laboratorium is, ten behoeve van de extrapolatie van de meetgegevens naar andere stroomgebieden in Zuid-Limburg, het LISEM-model (LImburg Soil Erosion Model) ontwikkeld, dat het ANSWERS model (Beasley & Huggins, 1982; De Roo, 1993) vervangt. Het LISEM-model is qua structuur vergelijkbaar met ANSWERS. De gebruikte procesvergelijkingen zijn echter totaal vernieuwd en verbeterd. Ook is er gekozen voor een structuur die geïntegreerd is in een Geografisch Informatie Systeem.

3 Beschrijving van de stroomgebieden

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de ruimtelijke en temporele variatie van een groot aantal landschappelijke factoren beschreven die van invloed zijn op het erosieproces. De beschreven factoren zijn bovendien nodig als invoer voor het LISEM-model en dienen tevens om het begrip van de processen te vergroten en de optredende problemen van erosie- en wateroverlast te kunnen verklaren.

3.2 Oppervlakte en reliëf

De oppervlakten van de stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat zijn vrijwel gelijk. Het stroomgebied Catsop beslaat 41,56 hectare. Het stroomgebied St. Gillisstraat is 42,79 hectare groot. Het oppervlak van het stroomgebied Etzenrade is ongeveer een faktor vijf groter, 224,36 hectare. De oppervlakten van de stroomgebieden, de hellingklassen en de verschillende vormen van landgebruik zijn berekend aan de hand van rasterkaarten. Door de omzetting van vector- naar raster-kaarten treedt er een kleine afwijking op van de werkelijke oppervlakten (Burrough, 1986).

In figuur 3.1 t/m 3.3 zijn de hellingklassenkaarten van de drie proefgebieden weergegeven. In tabel 3.1 zijn de relatieve oppervlakten van de verschillende hellingklassen in de drie hoofdstroomgebieden weergegeven. De indeling van hellingklassen correspondeert met de indeling in de Verordening Erosiebestrijding Landbouwgronden uit 1990 van het Landbouwschap. De hellingshoeken van de stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat komen sterk overeen. Bijna de helft van deze stroomgebieden bestaat uit hellingen tussen de 5% en 10%. Hellingen die steiler zijn dan 15% komen nauwelijks voor. Het stroomgebied Etzenrade wijkt van beide andere stroomgebieden af. Hier komen frequenter kleine hellingshoeken voor.

Tabel 3.1 Hellingklassen (in procent van totale oppervlakte)

	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade
00 - 02%	04,07	11,80	37,99
02 - 05%	34,74	27,55	34,84
05 - 10%	47,11	44,47	19,66
10 - 15%	10,54	15,61	05,58
15 - 18%	02,12	00,56	01,09
> 18%	01,42	00,00	00,84

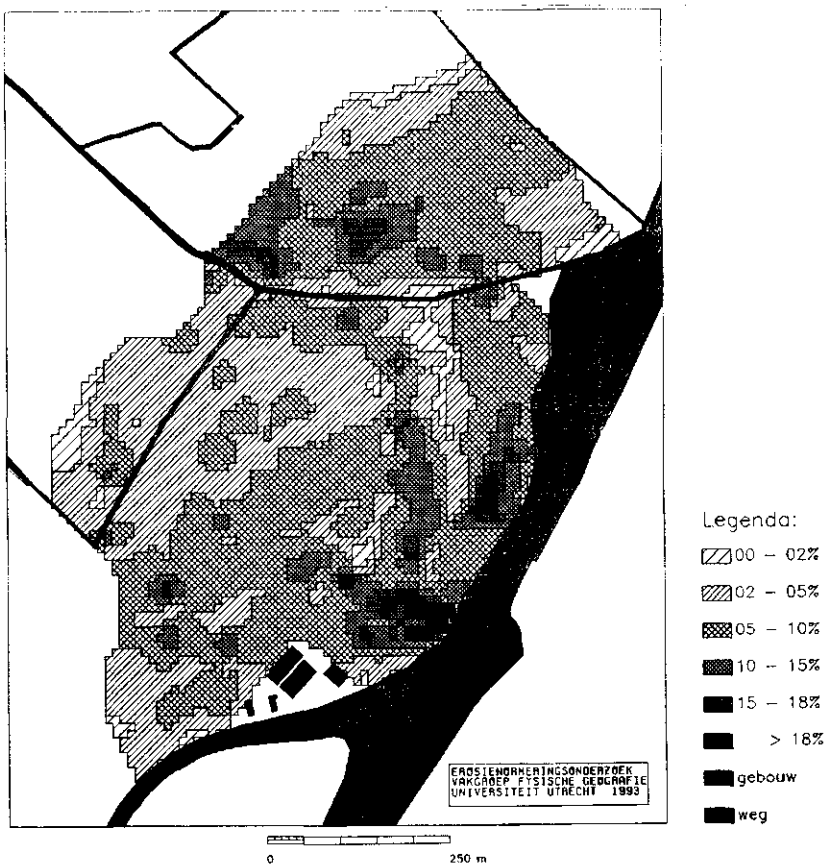


Fig. 3.1 Hellingklassekaart van het stroomgebied Catsop

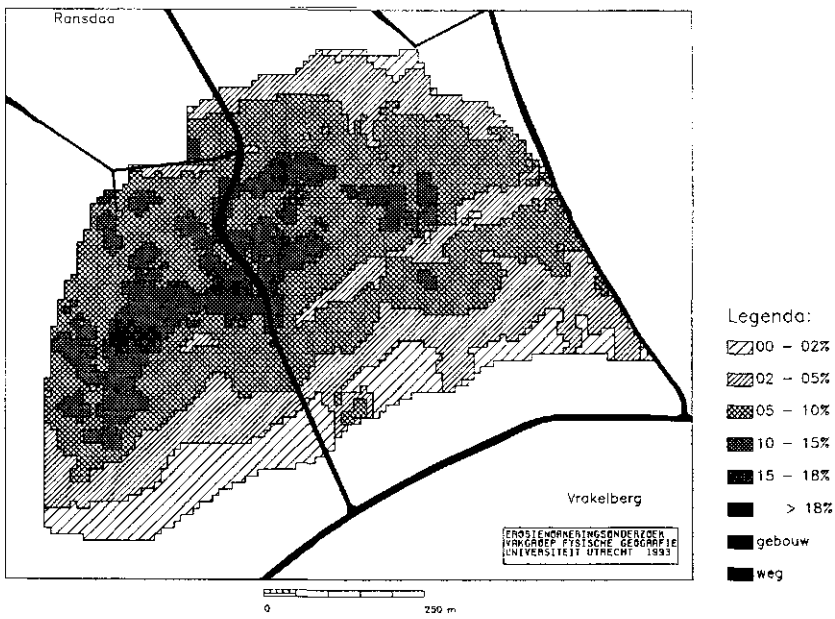


Fig. 3.2 Hellingklassekaart van het stroomgebied St. Gillisstraat

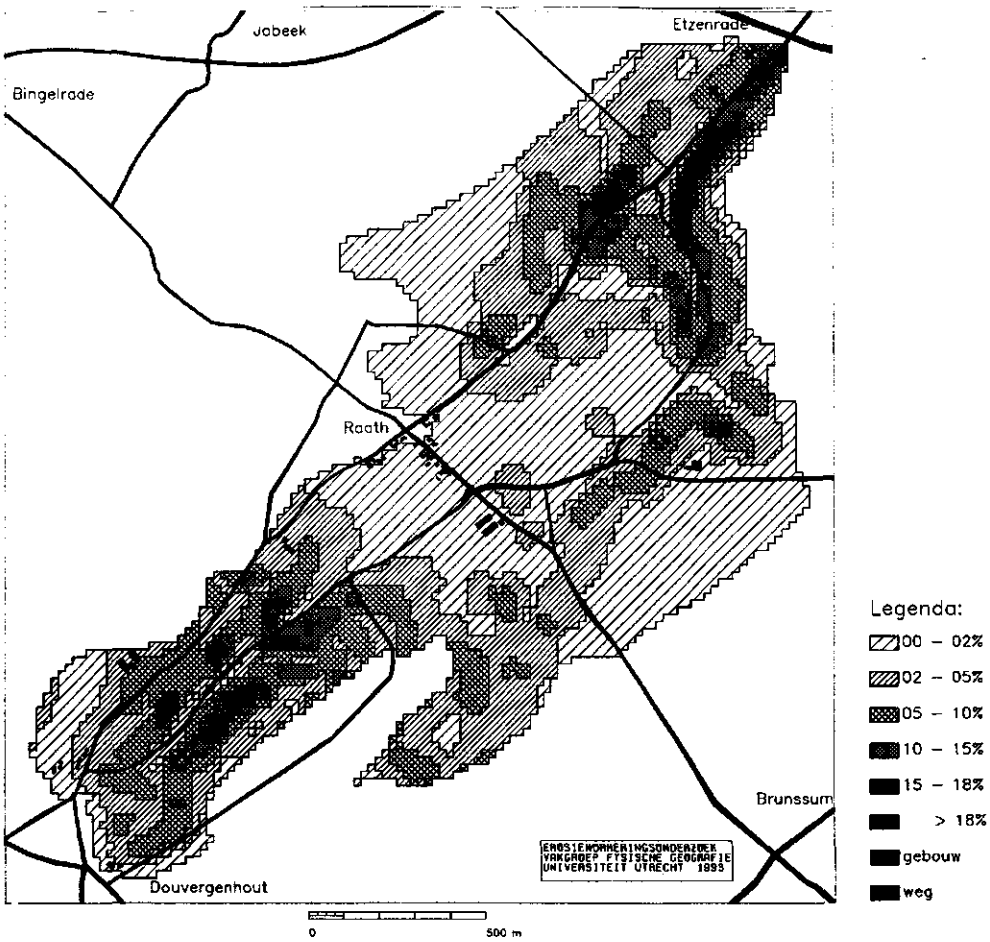


Fig. 3.3 Hellingklassekaart van het stroomgebied Etzenrade

3.3 Bodems

3.3.1 Bodemgeografisch onderzoek

De drie stroomgebieden zijn onderworpen aan een bodemgeografisch onderzoek (Leenders, 1994). Daarbij zijn vier boringen per ha verricht tot 150 cm beneden maaiveld of tot de vaste (stenige) ondergrond. Bij elke boring werd van de onderscheiden horizonten een aantal variabelen zoals dikte, organische-stof gehalte en textuur geschat en werd de profielopbouw gekarakteriseerd.

Van de drie stroomgebieden is een beschrijvende legenda opgesteld. Daarbij zijn op het hoogste niveau leemgronden, oude kleigronden en stenige gronden onderscheiden. Voor een verder onderverdeling van de hoogste niveaus en de verbreiding van de verschillende bodemtypen zie tabel 3.2.

Tabel 3.2 Onderverdeling van de hoogste niveaus van de bodemtypen van de drie stroomgebieden met de absolute en procentuele bijdrage aan de totale oppervlakte (naar Leenders, 1994).

Bodemtype	Oppervlakte (ha)	(%)
leemgronden:		
radebrikgronden	64	21
bergbrikgronden	72	23
bergbrikgronden met een colluviaal dek	40	13
poldervaaggronden in dalfase	<1	<1
ooivaaggronden in situ	21	7
ooivaaggronden in hellingfase	16	5
ooivaaggronden in hellingvoetfase	18	6
ooivaaggronden in dalfase	66	21
oude kleigronden:		
ondiepe kalksteengronden	5	2
kleefaarde	6	2
stenige gronden		
grindvaaggronden	<1	<1

De (löss-)leemgronden zijn de meest voorkomende bodemtypen in de drie gebieden. Deze zijn onderverdeeld in radebrik-, bergbrik-, poldervaag- en ooivaaggronden (tabel 3.2). De leemgronden bestaan tussen 0 en 80 cm - mv voor meer dan de helft van die dikte uit leem (materiaal met meer dan 50% deeltjes kleiner dan 50 µm). De löss bevat in deze gebieden meer dan 85% leemfractie (siltige leem). De rade- en bergbrikgronden hebben een briklaag, een door inspoeling ontstane B2t-horizont die naar verhouding wat meer lutum (deeltjes kleiner dan 2 µm) bevat. De radebrikgronden hebben nog een volledig profiel, waar bij de bergbrikgronden de oorspronkelijke A- en E-horizonten weggeërodeerd zijn. Later heeft op een deel van deze gronden weer sedimentatie plaatsgevonden. Leemgronden zonder briklaag zijn tot de vaaggronden gerekend. Deels zijn het leemgronden met sterk geërodeerde profielen, waarbij zowel A- als B-horizonten geheel of grotendeels verdwenen zijn; en deels zijn het leemgronden die uit geërodeerd materiaal zijn opgebouwd (colluviale gronden). De vaaggronden zijn onderverdeeld in poldervaaggronden met hydromorfe kenmerken binnen 50 cm - mv, en ooivaaggronden met hydromorfe kenmerken dieper dan 80 cm - mv. Op basis van de landschappelijke ligging zijn vier groepen vaaggronden onderscheiden (zie tabel 3.2).

Het resultaat van het bodemgeografisch onderzoek is een bodemkaart schaal 1 : 5000 de drie stroomgebieden (zie Leenders, 1994). De verdeling van de bodemtypen in de drie stroomgebieden ten opzichte van de verdeling van de bodemtypen in heel Zuid-Limburg is weergegeven in figuur 3.4. In de drie stroomgebieden ontbreekt de rivierklei in vergelijking met heel Zuid-Limburg. Deze grondsoort bevindt zich o.a. de Maasvallei, en het dal van de Geul, de Gulp enz. en komt dus niet voor in erosiegevoelige gebieden. In het stroomgebied Etzenrade is de löss op sommige plaatsen reeds verdwenen en is ouder fluviatiel materiaal (terras-grinden) aan het oppervlak gekomen. De samengestelde eenheden van de bodemkaart 1 : 50 000 bestaan voor het grootste deel uit hellinggronden, waarbij de bodemgesteldheid op korte afstand zo verschillend is dat moest worden overgegaan tot het onderscheiden van associaties van enkelvoudige legenda-eenheden. De verdeling van grondsoorten

in de drie stroomgebieden is representatief ten opzicht van de verdeling van de grondsoorten in heel Zuid-Limburg.

3.3.2 Korrelgrootte van de bodems

Ter bepaling van de textuur van de bovengrond, die voornamelijk van belang is voor de erosieprocessen en het verslempingsproces, zijn in de drie stroomgebieden monsters genomen van de bovenste 5 centimeter van de bodem. De monsters zijn gelijkmatig verspreid over het gehele stroomgebied en de aanwezige bodemtypen. Van deze monsters zijn tevens het organische stofgehalte en de pH bepaald.

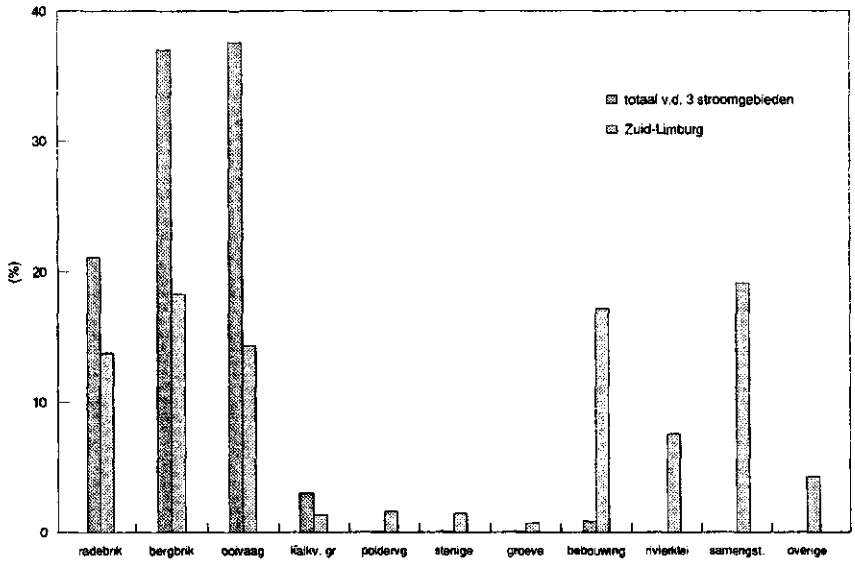


Fig. 3.4 Verdeling bodemtypen in Zuid-Limburg ten opzichte van de verdeling bodemtypen in de stroomgebieden. De gegevens van Zuid-Limburg zijn afkomstig van de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, blad 61-62 west en oost (Vleeshouwer en Damoiseaux, 1990)

De korrelgrootteverdeling van de bodemmonsters is bepaald volgens de NEN 5753 methode.

De zeven verschillende bodemeenheden die binnen de lössgronden zijn onderscheiden op de vervaardigde bodemkaart, zijn op grond van overeenkomstige kenmerken wat textuur betreft samengevoegd tot 4 bodemklassen: radebrikgronden, bergbrikgronden (waaronder bergbrikgronden met colluviaal dek), colluviale lössgronden (waaronder ooivaaggronden in dalfase, poldervaaggronden in dalfase) en ooivaaggronden (in situ, hellingfase en hellingvoetfase). In de tabel 3.3 t/m 3.5 zijn van de drie stroomgebieden de zand-, silt- en lutumgehaltes van de verschillende bodemklassen weergegeven. De lutum- en zandgehaltes van de lössbodems zijn in St. Gillisstraat respectievelijk significant hoger en significant lager dan in de twee andere stroomgebieden. Dit hangt samen met de meer zuidelijke ligging van het stroomgebied St. Gillisstraat. Mogelijk speelt ook de aanwezigheid van de lutumrijke kleefaarde en ondiep verweerde kalksteen in dit stroomgebied een rol. De onderscheiden bodemklassen in löss vertonen slechts kleine textuurverschillen. De lutumgehaltes zijn bij een

betrouwbaarheidsinterval van 90% niet significant verschillend. De silt- en zandfracties van de verschillende klassen binnen löss zijn wel significant verschillend.
De kleefaarde, de ondiep verweerde kalksteen en de terrasafzetting hebben een geheel andere textuur dan de lössbodems. De texturele samenstelling van de kleefaarde en de ondiep verweerde kalksteen blijken nauwelijks te verschillen. De lutum- en zandgehalten van deze bodems liggen respectievelijk rond 27% en 14%. De structuur van deze bodems is wel verschillend.

Tabel 3.3 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemklassen in het stroomgebied Catsop

	Zand			Silt			Lutum		
	gem[1]	st[2]	n[3]	gem	st	n	gem	st	n
radebrik.	11,57	2,89	(03)	75,88	2,08	(03)	12,55	0,91	(03)
bergbrik.	09,89	3,08	(07)	78,32	2,85	(07)	11,79	2,56	(07)
coll. löss	11,90	1,59	(20)	75,33	2,08	(20)	12,76	2,31	(20)
ooivaag in situ	11,10	0,83	(04)	72,73	1,01	(04)	16,17	1,17	(04)

1 : gemiddelde (%);
2 : standaarddeviatie;
3 : aantal waarnemingen.

Tabel 3.4 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemeenheden in het stroomgebied St. Gillisstraat

	Zand			Silt			Lutum		
	gem[1]	st[2]	n[3]	gem	st	n	gem	st	n
radebrik.	05,82	1,21	(03)	76,93	2,41	(03)	17,25	1,20	(03)
bergbrik.	05,11	1,49	(08)	79,81	3,05	(08)	15,09	3,29	(08)
coll. löss	07,38	0,91	(10)	77,40	3,74	(10)	15,22	3,48	(10)
ooivaag in situ	07,36	0,91	(03)	73,11	1,86	(03)	19,53	1,28	(03)
kalksteen	13,74	9,86	(03)	60,21	9,20	(03)	26,05	4,97	(03)
kleefaarde	13,25	2,55	(03)	58,39	5,29	(03)	28,36	5,53	(03)

1 : gemiddelde (%);
2 : standaarddeviatie;
3 : aantal waarnemingen.

Tabel 3.5 Textuur van de bovengrond van verschillende bodemeenheden in het stroomgebied Etzenrade

	Zand			Silt			Lutum		
	gem[1]	st[2]	n[3]	gem	st	n	gem	st	n
radebrik.	09,03	0,76	(04)	80,26	0,56	(04)	10,70	1,13	(04)
bergbrik.	06,97	2,03	(10)	79,56	3,56	(10)	13,47	2,90	(10)
coll. löss	10,70	2,21	(09)	77,91	1,14	(09)	11,39	2,51	(09)
ooivaag in situ	13,38	3,05	(04)	73,72	3,37	(04)	12,91	2,24	(04)
terrasafz.	60,30	----	(01)	31,54	----	(01)	08,16	----	(01)

1 : gemiddelde (%);
2 : standaarddeviatie;
3 : aantal waarnemingen.

3.3.3 Bodemfysische schematisatie

Inleiding

Modelberekeningen voor het LISEM-model vereisen invoergegevens voor wat betreft de doorlatendheid- en waterretentiekarakteristiek. Op basis van gelijkheid van bodemlagen in hun fysische eigenschappen worden lagen geclusterd, zodat een beperkt aantal 'fysische bouwstenen' resteren voor modelinvoer. Een belangrijk aspect hierbij is de keuze van de grondslag voor samenvoeging van bodemlagen (het functioneel criterium). In sommige studies wordt de stijghoogte gebruikt als functioneel criterium (Stolte & Wösten, 1991) soms aangevuld met het verzadigingstekort (Bannink & Wösten, 1988). Ook zijn studies uitgevoerd waarbij het verzadigingstekort, de verblijftijd en de doorlatendheid als functie van de luchtgevulde poriën als funtionele criteria zijn gebruikt (Wösten et al., 1986). Voor een erosiegevoeligheidsanalyse van de bodemlagen is een criterium nodig die de infiltratiecapaciteit en waterbergend vermogen beschrijft. Een grootheid hiervoor is de 'potentiële runoff' (neerslag - infiltratie). Zie voor een gedetailleerde beschrijving Stolte et al., 1994.

Methode

Voor het berekenen van het afvoerpercentage ten behoeve van de bodemfysische schematisatie is gebruik gemaakt van het computermodel SWMS_2D (Šimùnek et al., 1992). Het model is een numeriek model, oorspronkelijk ontwikkeld door Davis en Neuman (1983). Het programma analyseert de stroming van water in onverzadigd, gedeeltelijk verzadigd of volledig verzadigd materiaal. Bij aanname van een tweedimensionaal isothermische Darcy stroming van water, waarbij damptransport wordt verwaarloosd en de stromingsrichting hoofdzakelijk verticaal is geldt een aangepaste vorm van de Richard's stromingsvergelijking. Zie voor een gedetailleerde beschrijving van het model Šimùnek et al., 1992.

Van de verschillende bodemlagen zijn monsters gestoken (hoofdstuk 2.4). Van de bovengrond is daarnaast ook een bemonstering in tijd uitgevoerd (tabel 2.2). De bodemfysische karakteristieken van deze monster zijn, zoals vermeld, bepaald met de verdampingsmethode volgens Wind. Om de gemeten gegevens om te zetten in invoer voor SWMS_2D werd een Mualem-Van Genuchten fit-procedure uitgevoerd (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). Hierbij worden de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek beschreven volgens:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \tag{3.1}$$

$$K(h) = K_{fs} \frac{[(1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1}]^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{m(l+2)}} \tag{3.2}$$

waarbij:

$\theta(h)$	=	watergehalte als functie van de drukhoogte (-);
θ_r	=	residuair watergehalte (-);
θ_s	=	verzadigd watergehalte (-);
$K(h)$	=	doorlatendheid als functie van de drukhoogte (cm d^{-1});
K_{fs}	=	geoptimaliseerde verzadigde doorlatendheid (cm d^{-1});
h	=	drukhoogte (cm);
α, n, m, l	=	parameters die de vorm van de curve beschrijven (-).

De fit procedure werd uitgevoerd met behulp van het computer model RETC (Van Genuchten et al., 1991). Het resultaat van de fit is een set aan parameters van ieder monster. Een voorbeeld van een resultaat van lijn-fitten is te zien in figuur 3.5.

De parameter-set en de gemeten verzadigde doorlatendheid werden in een invoerfile voor SWMS_2D gezet. Op deze wijze werd elk individueel monster doorgerekend voor een tweejaarlijkse zomerbui en winterbui (figuur 3.6) met als eindresultaat een afvoerpercentage. Uit deze resultaten werd per bodemhorizont de gemiddelde parameterset en de uitersten geselecteerd en werden karakteristieke profielen per bodemtype vastgesteld op basis van de bodemkaart. Hierbij werd de A-horizont in drie lagen opgedeeld, die corresponderen met de monsterdieptes (figuur 3.7; tabel 2.1). Van deze bodemprofielen werd het afvoerpercentage berekend voor een tweejaarlijkse zomer- en winterbui en voor een vijentwintigjaarlijkse zomer- en winterbui (figuur 3.6).

Eerst werden de karakteristieken van de A-horizont constant gehouden en die voor de ondergrond gevarieerd. Hieruit werd een gemiddelde karakteristiek voor de ondergrond geselecteerd, waarna de karakteristieken van de A-horizont gevarieerd werden en die van de ondergrond constant. Op basis van deze berekeningen werd een clustering in fysische bouwstenen uitgevoerd.

Resultaat

Een voorbeeld van een resultaat van een afvoerberekening van individuele monsters is te zien in figuur 3.8. Uit deze resultaten is de gemiddelde, maximum en minimum berekende afvoer met bijbehorende parameterset gedestilleerd. Het resultaat van de berekeningen voor de vijf onderscheiden ondergronden met gelijke A-horizont is te zien in figuur 3.9.

Uit figuur 3.9 blijkt dat de afstroming bij verschillende ondergronden niet varieert. Er is zelfs geen verschil tussen de parametersets die de maximum en minimum afvoer beschrijven (behalve een minimaal verschil bij de vijentwintigjaarlijkse winterbui). Dit houdt in dat met één parameterset voor beschrijving van de laag dieper dan 30 cm-mv volstaan kan worden.

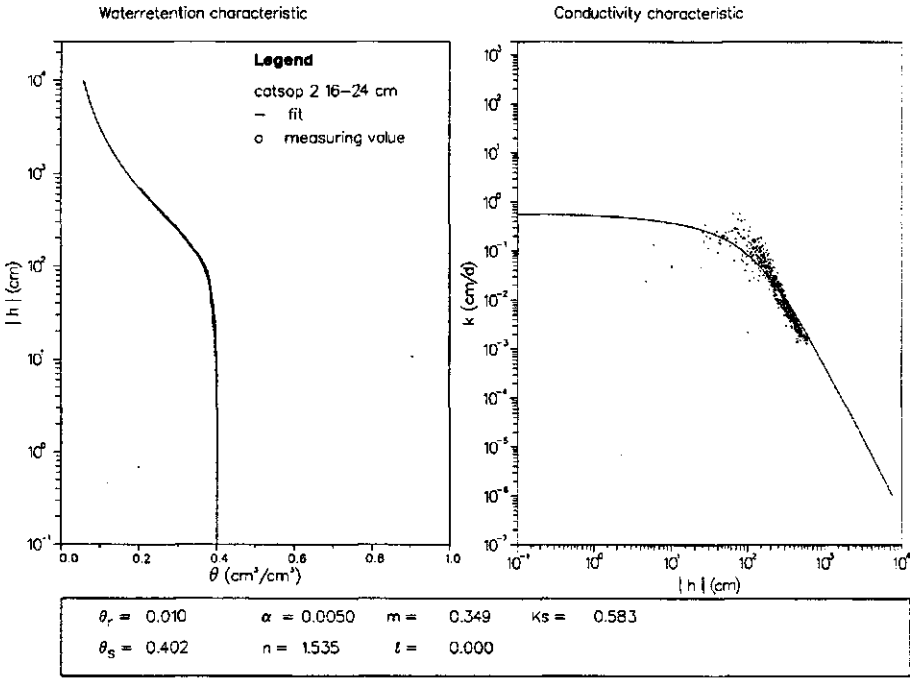


Fig. 3.5 Resultaat van RETC fit-procedure toegepast op een monster gestoken op 16 cm diepte in de helling Catsop. De gemeten punten zijn resultaten van de verdampingsmethode volgens Wind. De parameters beschrijven de lijnen volgens Mualem-Van Genuchten vergelijkingen

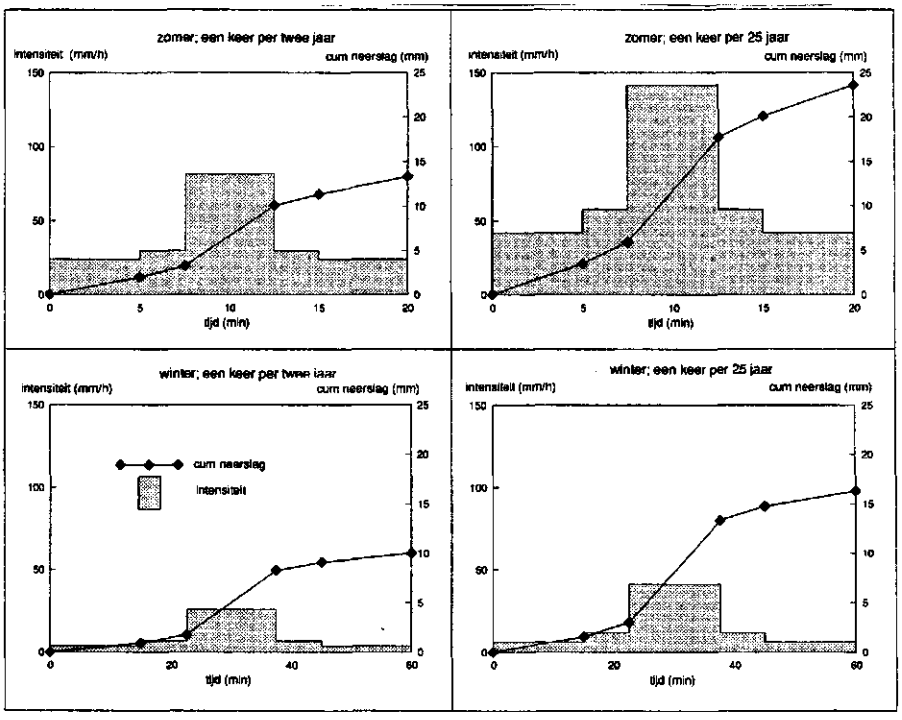


Fig. 3.6 Karakteristieken van buien waarmee karakteristieke profielen en, voor de tweejaarlijke buien, individuele monsters zijn doorgerekend met het computermodel SWMS_2D

Deze sessie is herhaald voor de gemiddelde karakteristiek van de ondergrond met de gemiddelde, maximum en minimum van de verschillende bovengronden. Dit heeft geresulteerd in een grote hoeveelheid afvoergegevens, die naar tijdstip en teeltsysteem zijn geclusterd tot fysische bouwstenen. Hiervan is de gemiddelde parameterset vastgesteld. De tijdstippen zijn:
— tot maximaal 1 maand na zaai;
— voorjaar;
— zomer;
— na stoppelbewerking/oogst;
— winter.
Daar er voor de verschillende teeltsystemen geen gegevens bekend zijn over de A-horizont beneden bewerkingsdiepte is ervan uitgegaan dat de A-horizont vanaf bewerkingsdiepte voor deze gronden fysisch vergelijkbaar is met de praktijksituatie, dus met de resultaten van de monsters genoemd in tabel 2.1. Hierdoor werd het mogelijk om de A-horizont in twee lagen op te splitsen: (i) van 0 tot 15 cm - mv en (ii) van 15 tot 30 cm - mv. Bij de verschillende teeltsystemen is de bovenste laag nog eens opgesplitst in van 0-10 cm en van 10 tot 15 cm - mv, om het effect van de verschillende bewerkingen te kunnen aantonen.

Voor elk van de genoemde tijdstippen is voor de bovenste laag van de A-horizont een fysische bouwsteen vastgesteld. Voor de rest van de A-horizont is voor het hele jaar voor de laag van 15 tot 30 cm - mv één bouwsteen vastgesteld.

Bij de teeltsystemen zijn voor de laag van 10 - 15 cm - mv de karakteristieken gebruikt van monsters van vergelijkbare praktijkpercelen voor de bovenste laag. Voor de laag dieper dan 30 cm - mv is ook één bouwsteen vastgesteld. Daarnaast is voor grasland en boomgaarden ook voor de bovengrond één bouwsteen vastgesteld, terwijl voor de boomgaard een afwijkende bouwsteen voor de laag van 15-30 cm - mv is geselecteerd. Voor de wielsporen is gebleken dat één karakteristiek voldoet om de verschillende soorten wielsporen afdoende te beschrijven. Voorzover bekend heeft de rijrichting geen invloed op de fysische karakteristieken.

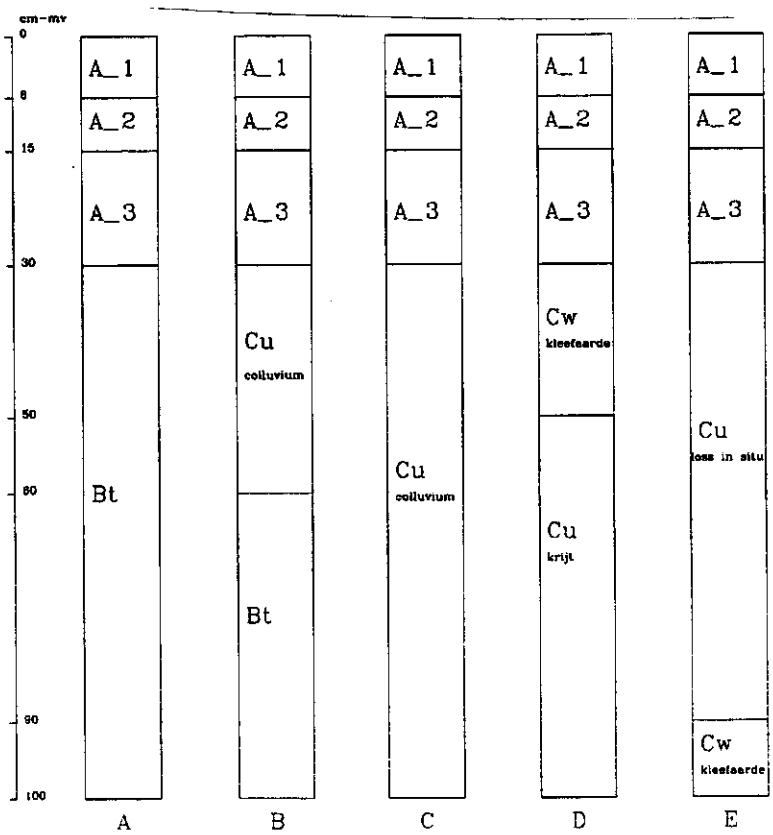


Fig. 3.7 Karakteristieke profielen van de bodemtypen voorkomend in de drie stroom gebieden. A = rade- en bergbrikgronden; B= berbrikgronden met colluviaal dek; C = polder- en ooivaaggronden; D = oude kleigronden; E = polder- en ooivaaggronden met kleefaarde in ondergrond

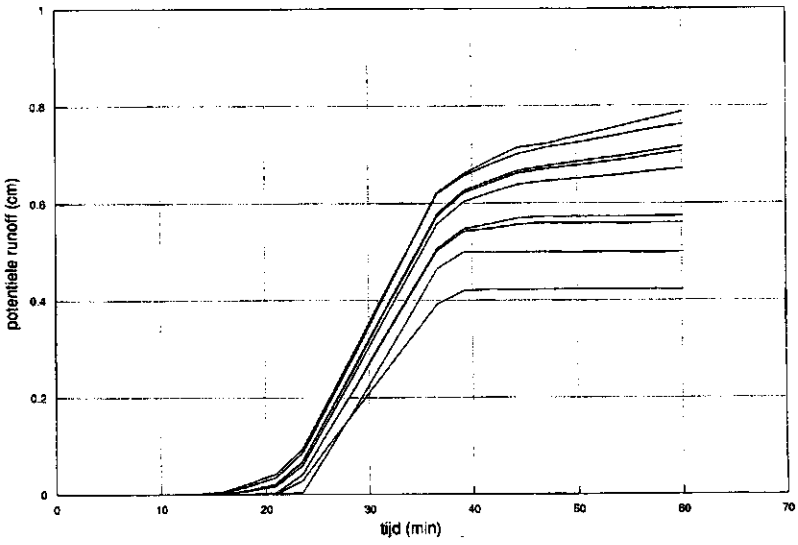


Fig. 3.8 Afvoerberekening van de individuele monsters gestoken in briklagen voor een tweejaarlijkse winterbui. De intiële drukhoogte is gesteld op -100 cm en de dikte van de doorgerekende laag op 10 cm

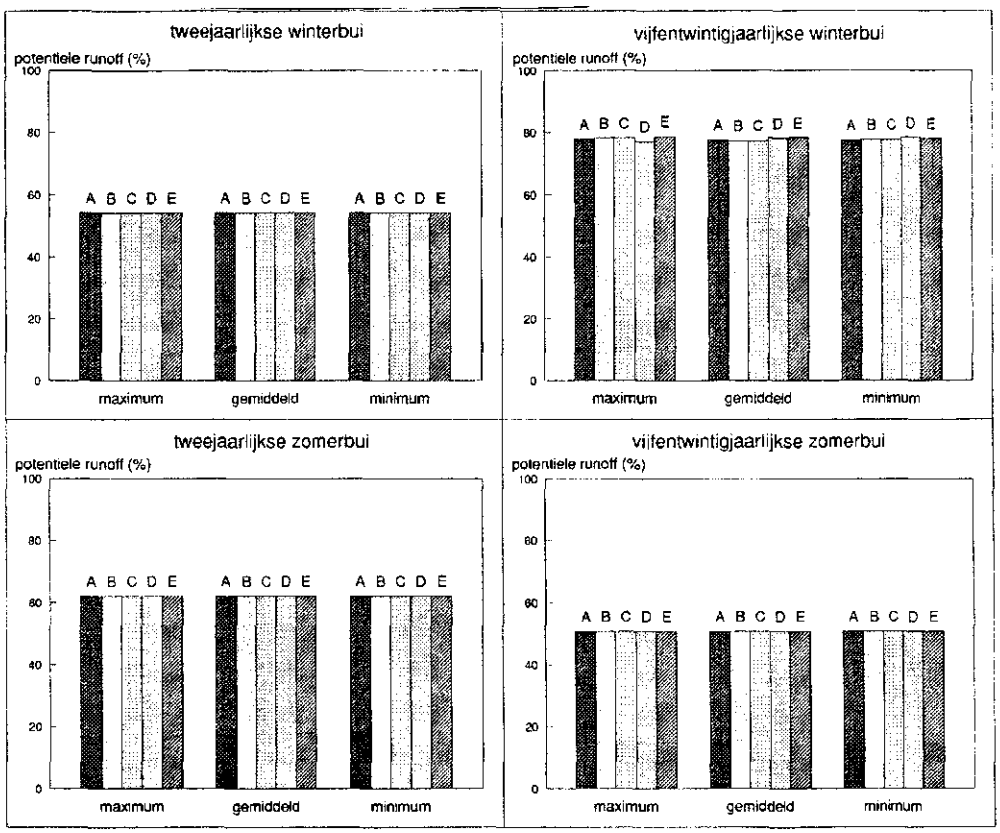


Fig. 3.9 Afvoerpercentages voor de vijf karakteristieke profielen met dezelfde bovengrond en minimum, gemiddelde en maximum karakteristiek voor de verschillende lagen van de ondergrond voor vier buien

Conclusie en discussie

Het resultaat van de clustering van bodemfysische karakteristieken is een bodemfysische beschrijving van de drie substroomgebieden op basis van 24 bouwstenen. Hierbij bestaat de ondergrond (= vanaf 15 cm - mv) voor alle gronden het gehele jaar uit een tweetal bouwstenen. Voor boomgaarden is een andere fysische bouwsteen nodig om de laag van 15-30 cm - mv afdoende te beschrijven dan voor de overige gronden. De rest van de bouwstenen beschrijven een bepaalde toestand van de bovengrond.

Tabel 3.6 Gemeten textuur van de verschillende bodem horizonten van de vier hellingen

Helling	Horizont	Lutum (%)	Leem (%)
Etzenrade	Ap	13	89
	Cd	19	95
	Bt2	21	97
	Ls	19	96
St. Gillisstraat, boomgaard	Ap	15	94
	Cd	20	96
	Bt2	22	97
	Ls	22	96
St. Gillisstraat, maïsperceel	Ap	19	93
	Lh	19	96
	Cd	16	93
	m	23	88
	R	58	93
Catsop	Ap	16	90
	Cd	17	91
	Ls	17	91

Van de monsters die genomen zijn van de verschillende locaties op de vier hellingen is de textuur bepaald (tabel 3.6). Uit tabel 3.6 blijkt dat de textuur van de A-horizont niet noemenswaardig verschilt tussen de gemeten monsters. De fysische schematisatie is niet te verklaren op basis van textuur, maar op basis van structuur. Voor de laag van 15 tot 30 cm - mv zijn alleen de praktijkpercelen van de hellingen bemonsterd en is ervan uitgegaan dat verschil in bewerking van de bovengrond geen invloed heeft op de fysische karakteristieken van deze tussenlaag. Een duidelijk afwijkende afvoer werd met de karakteristieken van de tussenlaag van de boomgaard berekend, wat een andere bouwsteen heeft opgeleverd.

De beschrijving van een gebied met behulp van fysische bouwstenen is een schematisatie. De schematisatie is alleen toepasbaar in de drie onderzoeksgebieden, omdat daar de ondergrond qua textuur en structuur niet veel verschilt (bijna alles is siltige leem). Voor extrapolatie naar andere gebieden zullen in sommige gevallen aanvullende metingen en berekeningen noodzakelijk zijn. Om toch iets over de betrouwbaarheid van de schematisatie te zeggen, zijn de beregeningsproeven, uitgevoerd op de proefboerderij Wijnandsrade in 1993, nagerekend (Van der Zijp, 1993). Hierbij zijn een aantal parameters zoals beginvochtgehalte van de ondergrond en 'ponding factor' geschat. Het resultaat van het gemeten neerslag overschot versus berekende afvoer is gegeven in figuur 3.10.

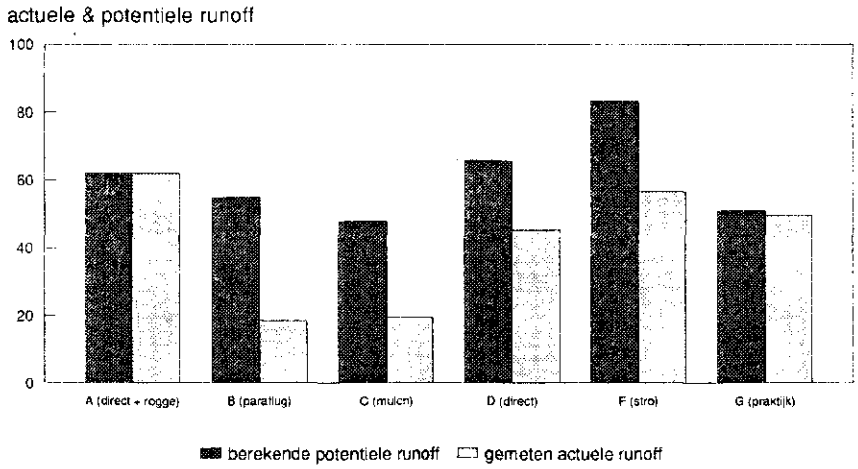


Fig. 3.10 Gemeten afvoer versus berekende neerslagoverschot voor een aantal proefvelden van de proefboerdrij Wijandsrade. De metingen hebben plaatsgevonden op maïsvelden van 23 t/m 25 juni 1993 en zijn uitgevoerd met een regensimulator. Voor de berekening zijn de fysische karakteristieken van de ondergrond van het profiel gelijk gehouden (vanaf 10 cm-mv) en zijn voor de bovengrond de gemiddelde karakteristieken per teeltsysteem gebruikt. Het vochtgehalte van de bovenste 5 cm is gemeten en als invoer voor de berekening gebruikt

Uit figuur 3.10 blijkt dat de tendens in afstroming verklaard kan worden door het verschil in bodemfysische karakteristieken. In absolute zin zijn de afvoer percentage niet altijd gelijk. Dit wordt veroorzaakt door (i) een vergelijking tussen een neerslag-infiltratie som en afvoer gegevens en (ii) een tekort aan betrouwbare invoergegevens voor het model. Bij de uitvoering van betreffende proeven is wat dat betreft onvoldoende gemeten om accurate simulaties uit te voeren.

3.3.4 Hellingprofielen

Voor vier hellingen waarin meetapparatuur voor meting van de hellinghydrologie is aangebracht (hoofdstuk 2.4) zijn dwarsdoorsneden samengesteld. Per helling zijn een vijftal boringen tot 300 cm - mv of tot de vaste (stenige) ondergrond beschreven en zijn een aantal tussenliggende boringen uitgevoerd. Bij de dwarsdoorsnede *Catsop* komt bovenaan de helling een opduiking van terrasmateriaal van de Maas voor. In het materiaal van de hellingfase bevindt zich kalkrijke löss, die als een hellingvoet in het colluvium ligt. Bij de dwarsdoorsnede *St. Gillisstraat, boomgaard* is onderaan sprake van graftencolluvium. Bovenaan is een volledig profiel aanwezig met een dunne uitspoelings horizont (de E-horizont). De textuur B-horizont wordt naar beneden toe dunner en is onderaan volledig weg-geërodeerd. De dwarsdoorsnede *St. Gillisstraat, maïsperceel* bevindt zich gedeeltelijk in een oude kleigrond. Onderaan de helling bevindt zich een pakket colluvium van enkele meters dikte met veel vuursteenknollen. Het colluviaal materiaal bevat iets meer lutum dan bij de andere hellingen (tabel 3.6) door bijmenging van kleefaarde die vanaf de helling is geërodeerd. Onderaan de helling van de *dwarsdoorsnede Etzenrade* ligt een laag colluvium van 1,5 meter dikte. Het colluviaal materiaal wigt uit over de briklaag. Voor gedetailleerde informatie zie Leenders, 1994.

3.4 Landgebruik

3.4.1 Oppervlakte

In figuur 3.11 t/m 3.13 is het landgebruik in de drie proefgebieden weergegeven. In de tabellen 3.7 en 3.8 zijn de relatieve oppervlakten van de verschillende vormen van landgebruik in de drie hoofdstroomgebieden weergegeven in de zomer- en winterperiode.

Tabel 3.7 Landgebruik winter 1991/92 (in procent van totale oppervlakte)

	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade
boomgaard (hoogstam)	0	0	1,13
boomgaard (laagstam)	0	27,53	0
grasland (permanent)	13,24	5,54	14,07
grasland (tijdelijk)	11,83	10,57	11,02
braak	21,32	35,11	48,45
groenbemester	19,85	9,11	3,36
wintertarwe	32,62	11,71	18,28
suikerbieten	0	0	0
aardappels	0	0	0
snijmaïs	0	0	0
moestuin	0,31	0	0,25
bebouwd	0	0	1,87
overig	0	0	0,36
verharde weg	0,82	0,43	1,22

Tabel 3.8 Landgebruik zomer 1992 (in procent van totale oppervlakte)

	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade
boomgaard (hoogstam)	0	0	1,13
boomgaard (laagstam)	0	27,53	0
grasland (permanent)	13,24	5,54	14,07
grasland (tijdelijk)	3,80	0,98	5,26
braak	0	0	0,07
groenbemester	0	0	0
wintertarwe	32,62	11,71	18,28
suikerbieten	30,78	19,20	24,27
aardappels	16,81	13,40	10,03
snijmaïs	1,63	21,22	23,20
moestuin	0,31	0	0,25
bebouwd	0	0	1,87
overig	0	0	0,36
verharde weg	0,82	0,43	1,22

In tabel 3.9 wordt het landgebruik in de drie proefgebieden vergeleken met gegevens van heel Zuid-Limburg. Hieruit blijkt dat in de proefgebieden relatief veel bouwland voorkomt. Binnen het bouwland valt op dat in Catsop relatief weinig maïs verbouwd wordt. In St. Gillisstraat is de klasse overig groot: hierbinnen valt de laagstamboomgaard. Door de aanwezigheid hiervan zijn de overige percentages lager dan in de rest van Zuid-Limburg. Etzenrade kent een gemiddeld landgebruik.

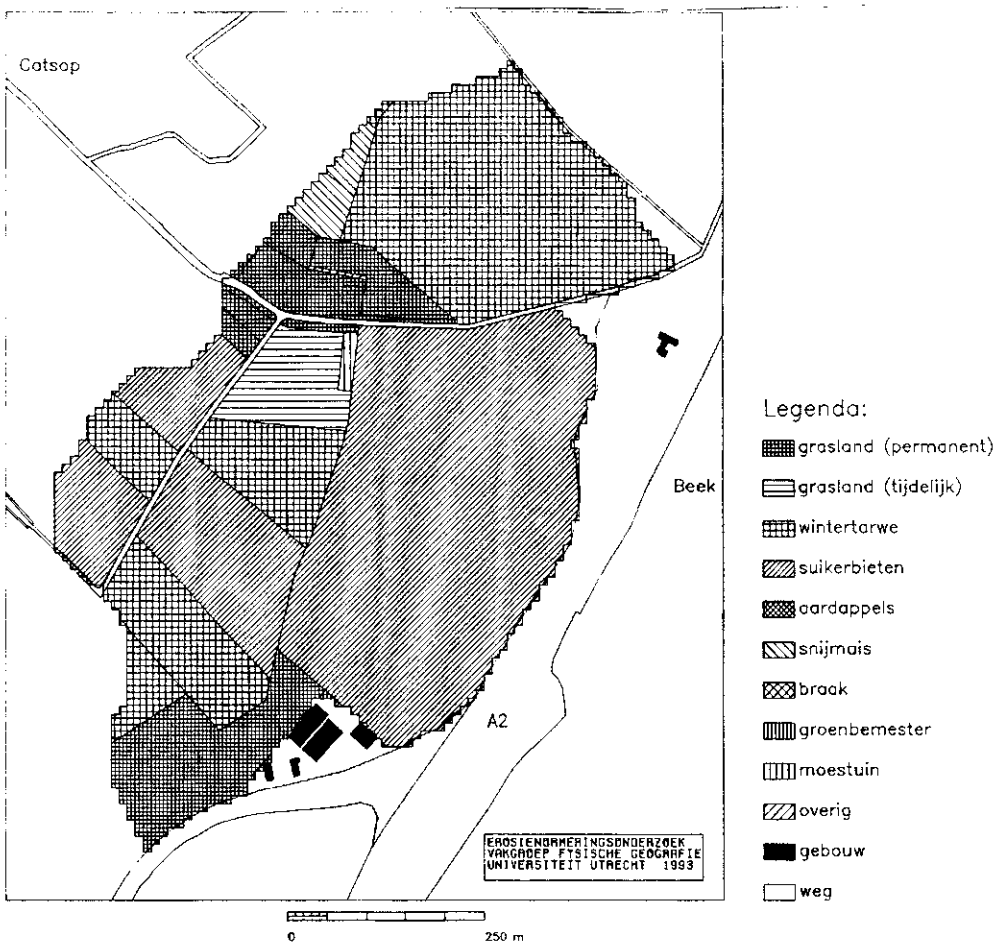


Fig. 3.11 Landgebruik in het proefgebied Catsop

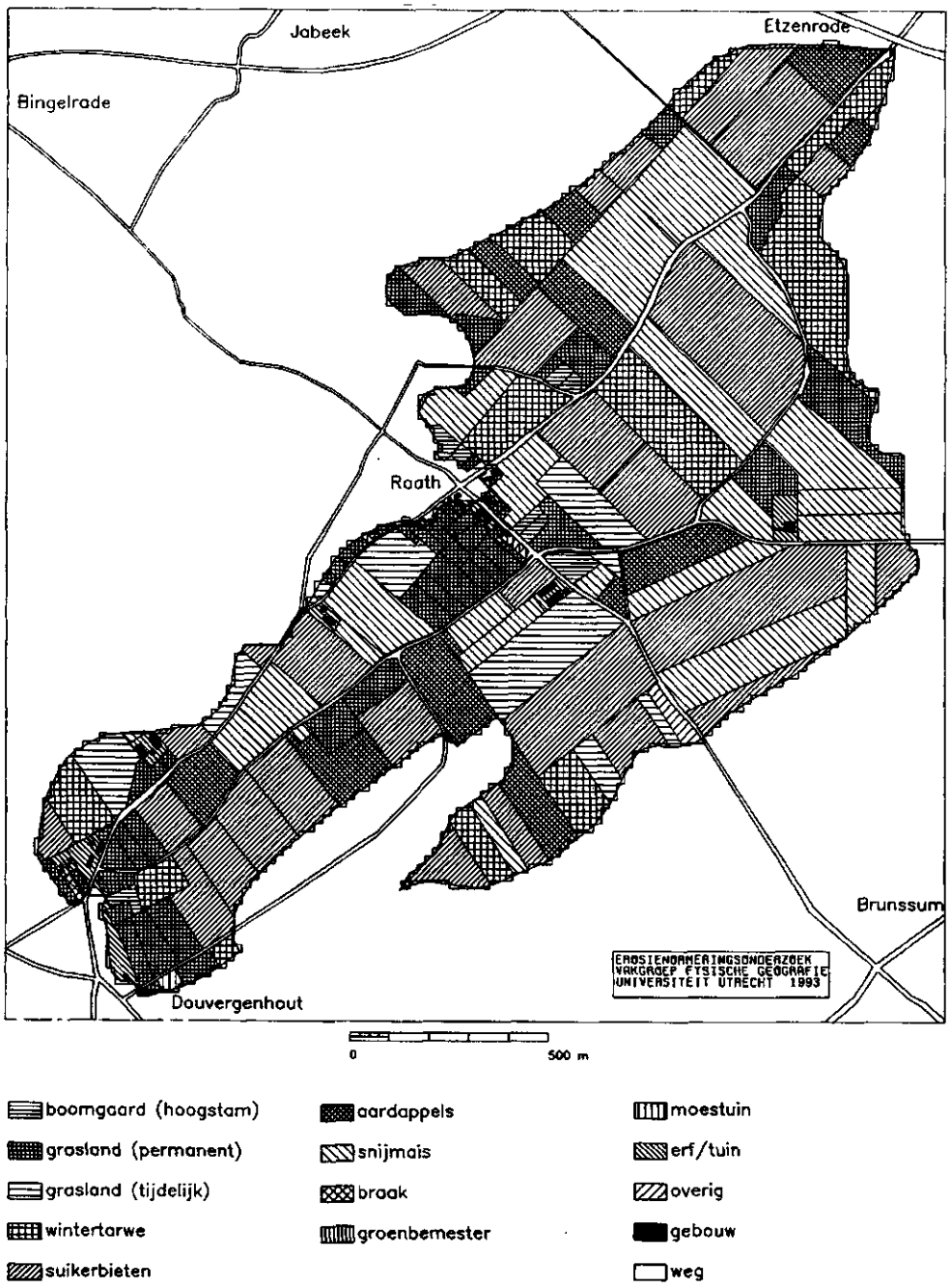


Fig. 3.12 Landgebruik in het proefgebied Etzenrade, zomer 1992

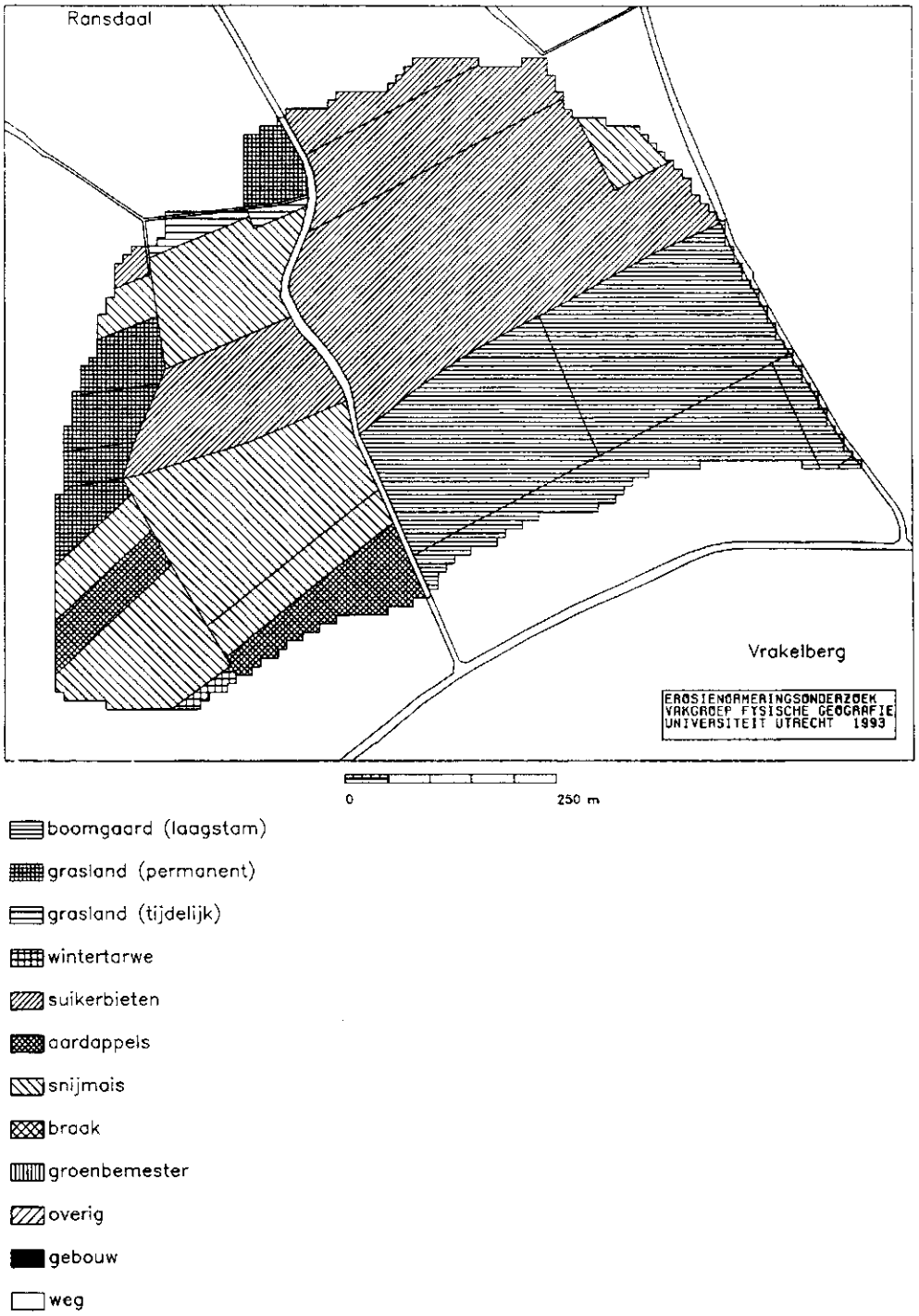


Fig. 3.13 Landgebruik in het proefgebied St. Gillisstraat, zomer 1992

Tabel 3.9 Representativiteit landgebruik (bron CBS 1992)

	Zuid-Limburg	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade
% bouwland*	54,0	85,94	94,03**	81,71
waarvan:				
wintergraan	33,8	37,95	12,40	22,37
suikerbieten	26,5	35,81	20,33	29,70
aardappels	11,1	19,56	14,19	12,27
snijmaïs	28,6	1,90	22,47	28,39
overig	2,9	4,78	30,61**	7,27

* bouwland = totaal-perm.grasl.- hoogstamboomgaard - verhard - bebouwd
** inclusief laagstamboomgaard

3.4.2 Verhard wegoppervlak

Doordat een deel van de stroomgebieden uit verharde wegen bestaat, kan al afvoer plaatsvinden bij een kleine neerslaggebeurtenis. Ook bij grote buien is een deel van de afvoer afkomstig van de wegen. Om te kunnen bepalen welk deel van de afvoer afkomstig is van verharde wegen, is het percentage verharde wegen in de stroomgebieden berekend. De percentages verharde weg staan vermeld in tabel 3.8. Verharde wegen spelen een dubbele rol in de problematiek van bodemerosie en wateroverlast. Het water kan niet infiltreren: ze genereren dus 100% afvoer. Doordat ze bovendien vaak ook fungeren als afvoerkanaal komt al het neerslagwater dat op een weg valt uiteindelijk onder in een dal terecht. Water dat als overland flow een verharde weg bereikt, zal over deze weg vrijwel ongehinderd naar beneden kunnen stromen. Een deel van de door het water meegevoerde bodemdeeltjes zal op de weg sedimenteren.

3.4.3 Wielsporen

In de stroomgebieden is onderzoek gedaan naar de hoeveelheid wielsporen in akkers. Daarnaast is de richting van de wielsporen en de mate van verdichting die heeft plaatsgevonden onderzocht. In de stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat zijn de wielsporen in alle percelen onderzocht. In Etzenrade zijn de wielsporen in enkele bietenpercelen onderzocht. In tabel 3.10 is het procentuele oppervlak van de wielsporen en de mate van verdichting weergegeven.

Tabel 3.10 Hoeveelheid en aard van wielsporen in verschillende percelen in 1992

Landgebruik	Oppervlak (%)	Breedte* (m)
wintertarwe	4,8	0,48
suikerbieten	12,8	1,28
aardappels	4,6	0,46
snijmaïs	22,5	2,25
groenbemester	12,8	1,28

* de breedte in bovenstaande tabel geldt voor een pixel-groote van 10x10 m. Braak, moestuin, tuinbouw overig, permanent grasland, tijdelijk grasland en boomgaard hebben een wielspoorbreedte van 0 m.

De sporen bij het landgebruik maïs ontstaan bij het inzaaien en bevinden zich om de andere gewasrij. De bodem onder de sporen is maar matig verdicht. In het veld zijn geen verschillen in bodemverdichting en breedte aangetroffen tussen zaaisporen en sporen die het gevolg zijn van het éénmalig bespuiten van het gewas. De bodem onder de sporen van het landgebruik aardappels en wintertarwe, die zijn veroorzaakt door het spuiten, is zeer verdicht. Bij het zaaien van aardappels en wintertawe ontstaan geen sporen.

In de suikerbietenpercelen varieert de hoeveelheid en de aard van wielsporen zeer sterk. In enkele percelen is het gewas bespoten met brede machines waardoor het percentage wielspoor rond de 5% ligt. De bodem onder deze sporen is zeer verdicht. Indien gewerkt is met een smallere spuitmachine is de hoeveelheid sporen veel groter. De bodem is hier matig tot sterk verdicht. Doordat niet altijd dezelfde sporen zijn bereden, is de bodemverdichting onder de spuitsporen verschillend en vaak niet te onderscheiden van zaaisporen.

3.4.4 De bedekkingsgraad

De bedekking van de bodem door gewassen speelt onder andere een rol in het interceptieproces. Er treedt een vermindering op van de hoeveelheid neerslag die de bodem bereikt, waardoor de oppervlakkige afvoer afneemt. Door de interceptie van regendruppels door het gewas neemt tevens de totale kinetische energie van de regendruppels af en wordt de bodem beschermd tegen druppelinslag. Bovendien wordt de val van een deel van de regendruppels, die uiteindelijk wel het bodemoppervlak bereiken, onderbroken door het bladerdek waardoor de kinetiche energie sterk gereduceerd wordt.

Gedurende het hele jaar in zowel 1992 als 1993 hebben karteringen plaatsgevonden van de bedekkingsgraad van de gewassen. Bij de karteringen is de bedekkingsgraad van de gewassen in het veld geschat. Getracht is om aan ieder perceel een waarde toe te kennen die een weerspiegeling is van de bodembedekking in het gehele perceel. Naast deze schattingen zijn de hoogtes van de gewassen opgemeten. Ter controle van de nauwkeurigheid van de veldschattingen zijn in 1992, in de maanden februari, mei, juni en augustus op enkele plots fotografische opnames gemaakt van de gewassen.

In tabel 3.11 is de gemiddelde bedekkingsgraad in 1992 en 1993 weergegeven. De maanden mei, juni en juli zijn opgesplitst omdat de bedekkingsgraad gedurende deze maanden sterk verandert. Deze waarden dienen tevens als 'standaard' referentiewaarde bij de invoer voor het LISEM-model.

Braakliggende akkers met najaarsbewerking hebben een bedekkingsgraad van gemiddeld 1%. Braak liggende akkers zonder najaarbewerking hebben een bedekkingsgraad van gemiddeld 10%.

Tabel 3.11 Gestandaardiseerde bedekkingsgraden afhankelijk van gewassoort en tijdstip

Maand	J	F	M	A	M*	M**	J*	J**	J1	J2	A	S	O	N	D
AWT	2	4	6	13	25	35	45	55	65	70	0	0	0	0	0
AB	0	0	0	0	3	10	32	68	85	82	80	76	72	68	0
AA	0	0	0	0	1	3	20	50	92	80	55	20	0	0	0
AM	0	0	0	0	0	3	12	30	50	60	55	50	0	0	0
AG	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	10	35	50	55
BB	95	95	95	95	0	0	0	0	0	0	0	0	5	85	95

AWT : wintertarwe; AM : snijmaïs;
AB : suikerbieten; AG : groenbemester:
AA : aardappels; BB : bodembedekker.
* 1-15 dag van de maand ** 15-31 dag van de maand

3.4.5 De gewashoogte

Een andere variabele, die bij het interceptieproces een rol speelt, is de gewashoogte. Op basis van de metingen kan er geconcludeerd worden dat er een relatie bestaat tussen de bedekkingsgraad en de gewashoogte voor alle gewassen. De correlatie tussen de bedekkingsgraad en de gewashoogte is verschillend per gewas. Deze verschillende relaties zijn gebruikt om bij elke bedekkingsgraad de hoogte van het betreffende gewas te kunnen schatten en als invoer van het LISEM-model te gebruiken. De metingen zullen in tabelvorm in de modelhandleiding worden opgenomen.

3.4.6 De leaf area index

De interceptiecapaciteit van gewassen wordt onder andere bepaald door de leaf area index. Er bestaat een relatie tussen leaf area index (LAI) en bedekkingsgraad (COV), ontwikkeld door Uenk et al. (1992):

$$LAI = -\frac{1}{k} * \ln(1 - COV) \qquad (3.3)$$

LAI = leaf area index
COV = bedekkingsgraad
k = extinctie coëfficiënt van zonnestraling in een gewas

De extinctie coëfficiënt van zonnestraling is specifiek voor ieder type gewas. In tabel 3.12 zijn de coëfficiënten vermeld voor verschillende gewassen (Uenk et al., 1992). Met behulp van de bedekkingsgraad, de extinctie coëfficiënten en de LAI kan de waterberging door interceptie bepaald worden.

Tabel 3.12 Extinctie coëfficiënten voor verschillende gewassen

Gewas	Coëfficiënt
snijmaïs	0,268
suikerbieten	0,557
aardappels	0,588
wintertarwe	0,400
wintergerst	0,545

3.5 De bodemruwheid

De bodemruwheid, het micro-reliëf van het bodemoppervlak, wordt beïnvloed door enerzijds grondbewerking en vegetatie en anderzijds neerslag, stromend water, vorstdooi en wind (Allmaras et al., 1967; Burwell & Larson, 1969; Gayle & Skaggs, 1978; Zobeck & Onstad, 1984). De grootte van bodemruwheid en hellingpercentage bepalen de hoeveelheid oppervlakkige berging van water in micro-depressies (Allmaras et al., 1966; Moore and Larson, 1979; Onstad, 1984; Linden et al., 1988). De bodemruwheid kan worden ingedeeld in vier schaalniveaus (Römkens & Wang, 1986):

1. Microrelief variaties veroorzaakt door stapeling van bodemdeeltjes en aggregaten (0 - 2 mm);
2. Willekeurige variaties van de bodemruwheid (100 mm) veroorzaakt door ploegen;
3. Georiënteerde ruwheid van de bodem (loodrecht op de bewerkingsrichting) als gevolg van grondbewerking (ploegen, cultiveren en zaaibed bereiding) (100 - 200 mm);
4. Hogere orde ruwheid op landschappelijk niveau (bv. graften).

De bodemruwheid heeft invloed op de hoeveelheid en het begin tijdstip van oppervlakkige afstroming. De snelheid van oppervlakkige afstroming is ook afhankelijk van de bodemruwheid (Allmaras et al., 1966; Moore & Larson, 1979; Onstad, 1984; Linden et al., 1988). Bovendien wordt het met water bedekt oppervlak gedurende een regenbui gerelateerd aan de bodemruwheid. Dit is van belang voor de infiltratie van water. Deze bedekkingsfractie met water heeft bovendien invloed op de zowel de hoeveelheid spaterosie door regendruppels als het bodemverlies ten gevolg van oppervlakkige afstromend water.

De factoren die van invloed zijn op de bodemruwheid en de oppervlakte berging van water zijn in het veld gekarteerd: gewassoort, bewerkingsrichting, wielsporen en verslemping. De hellingpercentages en de oriëntatie van de bewerkingsrichting ten opzichte van de maximale helling zijn verkregen uit het digitaal terrein model.
Voor de bepaling van de bodemruwheid zijn een grote hoeveelheid exacte hoogte metingen van het bodemoppervlak vereist. De hoogtemetingen zijn verkregen met behulp van een 'pennenmeter'. Uit de hoogte metingen verricht met de pennenmeter is een ruwheidindex berekend. Uit literatuuronderzoek is gebleken dat de 'Random Roughness (RR)' (Allmaras et al., 1966) de meest gehanteerde index is voor de willekeurige bodemruwheid, op basis van exacte hoogte waarnemingen. Deze ruwheidindex is vervolgens gebruikt als maat voor de berekening van de oppervlakkige bodemberging en de met water bedekte fractie van de bodem.

Bovendien is de Manning ruwheid gecorreleerd aan de ruwheidindex. De Manning ruwheid is van belang voor de snelheid van afstromend water.

De verschillen in random roughness in landgebruik zijn zowel voor de gehele dataset, als voor iedere tijdsperiode significant ($p<0.05$). In de standaard tabel is voor ieder type landgebruik een bijbehorende bodemruwheid vermeld. De temporele verschillen zijn significant ($p<0.05$) voor de gehele datset. Echter, uitgesplitst naar type landgebruik, zijn de temporele verschillen niet significant voor suikerbieten, snijmaïs, boomgaard, aardappels en braak (geploegd). Deze typen landgebruik en andere typen landgebruik, die slechts in een tijdsperiode zijn bepaald, kunnen ter standaardisatie niet temporeel worden ingedeeld.

De verschillen in random roughness in orientatie ten opzichte van de bewerkingsrichting (en zaaibed), zijn significant voor zowel de gehele dataset alsmede voor alle typen landgebruik. Een uitzondering vormt braak (onbewerkt) en alle typen landgebruik waarbij in ieder geval geen georienteerde ruwheid aanwezig is: grasland (permanent en tijdelijk), wintertarwe, groenbemester, en boomgaard. Ter standaardisatie is voor de significante typen landgebruik de bodemruwheid ingedeeld in orientatie-richting en, indien aanwezig, het zaaibed. Met de perceelvariantie is ten behoeve van de standaardisatie van de RR-indices geen rekening gehouden. De gestandaardiseerde RR-indices zijn, afhankelijk van landgebruik, tijdsperiode en orientatie, weergegeven in een tabel 3.13. De bodemruwheid onder aardappel en geploegde akkers is het grootst.

Tabel 3.13 Gestandaardiseerde RR-indices in cm

Landgebruik	Orientatie[1]	Winter	Zomer		
		oogst-mrt	apr-15 mei	16 mei-jun	jul-oogst
suikerbieten	dwars	-	1,32	1,32	1,32
	evenwijdig	-	0,99	0,99	0,99
	zaaibed	-	0,40	0,40	-
snijmaïs	dwars	-	1,68	1,68	1,68
	evenwijdig	-	1,14	1,14	1,14
	zaaibed	-	0,64	0,64	-
wintertarwe	-	1,10	0,71	0,90	0,94[2]
aardappels	dwars	-	8,16[3]	8,16[3]	8,16[3]
	evenwijdig	-	1,17	1,17	1,17
grasland (tijd.)	-	0,96	0,96	0,96	0,96
grasland (perm.)	-	0,99	0,81	0,70	0,52
boomgaard	-	0,73	0,73	0,73	0,73
groenbemester	-	1,27	-	-	-
braak (onbewerkt)	-	0,97	-	-	-
braak (gecult.)	dwars	3,37	-	-	-
	evenwijdig	1,73	-	-	-
braak (geploegd)	dwars	3,37	-	-	-
	evenwijdig	2,40	-	-	-

[1] orientatie ten opzichte van de bewerkingsrichting, indien georienteerde ruwheid aanwezig is.
[2] gemiddelde waarde van de overige 3 tijdsperioden.
[3] voor aardappel ruggen mag het concept van de random roughness niet gebruikt worden. De afstroming richting dient te worden aangepast.

3.6 De schuifweerstand

Onderzoek van Rauws en Govers (1988) heeft aangetoond dat de schuifweerstand van de bodem een effectieve maat is voor het losmaken van bodemdeeltjes door runoff. Onderzoek van Cruse en Larson (1977) heeft eveneens aangetoond dat er een verband is tussen het losmaken van bodemdeeltjes door druppelinslag (spatterosie) en de schuifweerstand van de bodem. De schuifweerstand van de bodem is dus een maat voor de erodibiliteit. De schuifweerstand of bodemcohesie wordt beïnvloed door het vochtgehalte. Deze relatie tussen het bodemvochtgehalte en de schuifweerstand is aangetoond door Coote et al. (1988). Hieruit volgt dat de erodibiliteit niet constant is gedurende het gehele jaar maar dat deze varieert van seizoen tot seizoen.

De schuifweerstand is in het veld bepaald met een pockettorvane. Gewerkt is met een bladgrootte met een diameter van 2.5 cm. Het meetbereik van dit blad ligt tussen de 0 en 1 kg/cm^2 (tussen 0 en 0.98 kPa). De waarden die op deze manier zijn verkregen, zijn sterk afhankelijk van het momentane bodemvochtgehalte. Metingen zijn in alle drie de stroomgebieden uitgevoerd bij verschillende vormen van landgebruik en verschillende bodemeenheden. Per gecombineerde landgebruik- en bodemeenheid zijn per stroomgebied op één locatie 10 metingen verricht. De aardappelvelden zijn opgesplitst in aardappelruggen en aardappeldalen.

Een aantal factoren is van invloed op de schuifweerstand van de bodem. Deze factoren zijn: bodemtype, landgebruik en tijdstip en soort van bodembewerking. Alle factoren zijn in dit onderzoek meegenomen.

De variatie in schuifweerstand kan worden ingedeeld in ruimtelijke en temporele variatie. De ruimtelijke variatie is onderverdeeld in:
— variantie binnen een perceel
— variantie tussen twee percelen in een gelijke klasse
— variantie als gevolg van de indeling in bodemtype en landgebruik
De verschillen in schuifweerstand tussen twee verschillende percelen zijn groot. Een gemiddelde waarde van de schuifweerstand per perceel zal dan ook alleen maar bij benadering de werkelijke waarde voor de schuifweerstand op een bepaald punt uitdrukken.

Op grond van de metingen kan geconcludeerd worden dat er significante verschillen zijn in de schuifweerstand van de bodem tussen de gewassen grasland (permanent), grasland (tijdelijk), suikerbieten en aardappels (rug). Voor de gewassen snijmaïs, wintertarwe en aardappels (dalen) is een onderverdeling per bodemtype aan te geven. Voor het gewas suikerbieten is een temporele indeling in apr/mei en jun/jul te maken. De schuifweerstand onder grasland en in boomgaarden is in het algemeen hoog, wat duidt op een sterke weerstand tegen erosie. De schuifweerstand is laag onder bouwland, met name onder bieten en maïs, wat duidt op een hoge erosiegevoeligheid. In tabel 3.14 zijn de gestandaardiseerde schuifweerstanden weergegeven. De schuifweerstand is een directe invoer variabele van het LISEM-model. De standaardisatie is uitgevoerd aan de hand van een variantieanalyse. Voor het landgebruik wintertarwe, snijmaïs en aardappels (dal) is er een indeling gemaakt in drie bodemtypen (lössbodems (löss), verweerde kalksteen (kalk) en kleefaarde (kleef). Voor de overige

gewassen is er een indeling gemaakt tussen zomer en winterperiode. Binnen de zomerperiode is vervolgens een indeling gemaakt tussen de maanden april/mei en juni/juli.

Tabel 3.14 Gestandaardiseerde schuifweerstand, afhankelijk van tijdsperiode bodemtype en landgebruik*

Periode	Winter	Apr/mei		Jun/jul		
landgebruik	löss/kalk	kleef	löss/kalk	kleef	löss/kalk	kleef
wintertarwe	1,00	0,90	1,00	0,90	1,00	0,90
snijmaïs	---	---	0,88	2,39	0,88	2,39
aardappels (dal)	---	---	1,00/2,52	0,62	1,02/2,52	0,62
aardappels (rug)**	---	---	---	---	---	---
suikerbieten	---	---	0,59	0,59	0,86	0,86
grasland (permanent)	---	---	3,32	3,32	3,32	3,32
grasland (tijdelijk)	---	---	1,24	1,24	1,24	1,24
boomgaard (gras)	---	---	3,73	3,73	3,73	3,73
boomgaard (kaal)	---	---	1,93	1,93	1,93	1,93
braak (onbewerkt)	1,34	1,34	---	---	---	---
braak (gecultiveerd)	0,93	0,93	---	---	---	---
italiaans raaigras	1,96	1,96	---	---	---	---
groenbemester		2,24	2,24	---	---	------

*: alle waarden in kPa
**: de schuifweerstand ligt onder het meetbereik

3.7 Aggregaatstabiliteit

De potentiële spaterosiegevoeligheid van de bodem wordt bepaald door de stabiliteit van de aggregaten (Bryan et al., 1989). Aggregaten ontstaan als gevolg van bodembewerking (ploegen en cultiveren) en de verkittende werking van lutum en organische stof. De microbiologische activiteit en de vegetatie kunnen eveneens bijdragen aan de vorming van aggregaten (Young et al., 1990). Aggregaten zijn een 'samenklontering' van individuele bodemdeeltjes. De weerstand van aggregaten tegen uiteenvallen is een maat voor de weerstand van de bodem tegen structuurverval. Verval van aggregaten treedt op onder invloed van neerslag, stromend water, vorst-dooi en wind (Young et al., 1990).

De stabiliteit van aggregaten is gemeten met de druppeltest van Low (1954). De variatie in aggregaatstabiliteit kan worden opgedeeld in ruimtelijke en temporele variatie. De ruimtelijke variatie is onderverdeeld in:
— variatie binnnen een perceel;
— variatie tussen twee percelen in een gelijke klasse;
— variatie als gevolg van indeling in bodemtype en landgebruik.
De ruimtelijke variatie binnen een perceel is verkleind door de bepaling van één mediaan waarde per 25 of 40 aggregaten.

De mediane aggregaatstabiliteit is in alle bodems significant verschillend. De grotere aggregaatstabilteit op kleefaarde hangt samen met een groter lutum- en organisch stofgehalte en een hogere pH waarde.

Aggregaat-stabiliteit verschilt significant in vrijwel alle typen landgebruik. In mei vertonen de verslempte wintertarwepercelen een geringere aggregaatstabiliteit, in tegenstelling tot Van Eijsden en Imeson (1986) die een grotere aggregaatstabilteit op wintertarwepercelen ten opzichte van suikerbieten en snijmaïs constateerden. Voor de gehele dataset is de aggregaatstabiliteit significant verschillend in de tijd. Een significante temporele indeling per type landgebruik is alleen geconstateerd voor suikerbieten. De kleinste aggregaatstabiliteit is waargenomen in de winterperiode. Door het ploegen en bereiding van het zaaibed in het voorjaar worden stabiele aggregaten gevormd. Naar mate het groeiseizoen vordert neemt de aggregaatstabiliteit nog verder toe. Aanwezigheid van gewasresten en een hogere temperatuur resulteert in een toename van het bodemleven (Huigen, 1986). Het bodemleven beïnvloedt de aggregaatstabiltiteit in positieve zin. In september en oktober neemt de aggregaatstabiliteit af.

In tabel 3.15 is de standaardisatie weergegeven in mediaan aantal waterdruppels van de aggregaatstabiliteit van alle waarnemingen in 1992 en 1993. De aggregregaatstabiliteit is een directe invoer variabele van het LISEM-model, en bepaalt de mate van erodibiliteit van de bodem voor druppelinslag. Voor bodemtype is een significante indeling gemaakt in de bodemklasse lössbodems/ondiep verweerde kalk enerzijds én kleefaarde anderzijds. De aggregaatstabiliteit van lössbodems en ondiep verweerde kalk is tevens significant verschillend in de tijd.

Tabel 3.15 Gestandaardiseerde waarde van de aggregaatstabiliteit

Periode	Indeling								
	bodemtype	löss en verweerde kalk				kleefeerde			
	landgebruik****	AG	BRpl	BRcul	AWT	AG	BRpl	BRcul	AWT
nov-mrt		15	15	15	15	35*	35	35*	35
	landgebruik****	AB	AM	AA	AWT	AB	AM	AA	AWT
apr-mei		18.5	19	22	14	35*	35	35	35
jun-aug		26	26	26	-**	35	35	35	-**
sep		20***	23	-**	-**	35*	35	-**	-**
okt		13	-**	-**	-**	35	-**	-**	-**

* betreffende eenheid komt niet voor. Omdat er geen significante verschillen zijn binnen dit bodemtype, is een gelijke waarde verondersteld.

** in de betreffende periode komen geen agregaten voor op deze typen landgebruik.

*** geen aggregaatstabiliteit bepaald, geïnterpoleerde waarde.

**** BR-pl : recentelijk geploegd;
BR-cul : recentelijk gecultiveerd;
AG : groenbemester:
AWT : wintertarwe;
AB : suikerbieten;
AA : aardappels;
AM : snijmaïs.

3.8 Erosieverschijnselen en verslemping

Gedurende het groeiseizoen van 1992 zijn karteringen uitgevoerd van de verslempingsgraad van de bodem. De verslemping is in het veld beoordeeld. De mate van verslemping wordt weergegeven door middel van een cijfer dat varieert van 1 (volledig verslempt) tot 10 (geheel niet verslempt). Als leidraad voor deze veldmethode fungeert de beoordeling van verslemping volgens Boekel (Boekel, 1966). Op basis van de metingen kan er worden geconcludeerd dat de mate van verslemping van de bodem onder meer afhankelijk is van de tijd sinds bewerking en de bodembedekking. Doordat de akkers met wintertarwe gedurende een lange periode nauwelijks worden bedekt, is de bodem hier zeer sterk verslempt. Bij de zomergewassen is de verslemping minder groot. Door de verschillende structuur van het bodemoppervlak en de subjectieve bepaling van de verslempingsgraad, is het moeilijk om de verslemping onder suikerbieten, aardappels en snijmaïs te vergelijken.

Gedurende het onderzoek zijn de waargenomen erosieverschijnselen gekarteerd. De erosieverschijnselen per stroomgebied zijn weergegeven in figuur 3.14 t/m 3.16. Onderscheiden zijn rills, gullies, colluvium en doorbraken van rills of gullies door graften en de taluds van holle wegen. De erosieverschijnselen zijn op de meeste locaties zowel in de winterperiode als in de zomerperiode waar te nemen. Een verschillende ligging van rills en colluvium in de zomer- en de winterperiode is veelal het gevolg van de aard en de locatie van de tractorsporen. De omstandigheden waarbij rills ontstaan zijn in de winterperiode anders dan in de zomerperiode. In de winter zijn de akkers vrijwel niet bedekt en is het bodemvochtgehalte zeer hoog waardoor kritische condities al bij een kleine neerslaggebeurtenis bereikt kunnen worden.
In tabel 3.16 staan enkele kwantitatieve gegevens omtrent erosie en sedimentatie in de proefgebieden. Het betreft ruwe schattingen op basis van de gekarteerde rills en sedimentatie-plekken. Benadrukt wordt dat slechts het zichtbare bodemverlies is weergegeven. Uit onderzoek is gebleken dat er bodemverliezen van 10 ton/ha kunnen optreden zonder dat er sprake is van rills (interrill erosie) (F. Kwaad, mondelinge mededeling). Ook uit de hoeveelheden sedimentatie blijkt al dat er een aanzienlijke hoeveelheid 'niet waarneembare' erosie is.

Tabel 3.16 Erosieverschijnselen in de proefgebieden

	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade
aantal rills	8	9	18
totaal lengte rills (m)	780	810	1810
aantal gullies	0	3	0
totaal lengte gullies (m)	0	310	0
aantal doorbraken	1	3	3
aantal plaatsen sedimentatie	5	7	7
totale oppervlakte sedim,(ha)	0,57	1,14	1,65
opp. sedientatie (% stroomgebied)	1,37	2,66	0,74
geschat bodemverlies (ton)*	46,8	164,5	108,8
geschat bodemverlies (ton/ha)	1,13	3,84	0,48
geschatte sedimentatie (ton)**	256,5	513,0	742,5
geschatte sedimentatie (ton/ha)	6,17	11,99	3,31

* zichtbaar bodemverlies gedurende de projectperiode (2 jaar), exclusief interrill erosie!: rill= 20cm breed, 20 cm diep; gully = 50 cm breed, 50 cm diep; bulkdichtheid is 1500 kg/m^3.

** oppervlakte * dikte van gemiddeld 3 cm, bulkdichtheid 1500 kg/m^3.

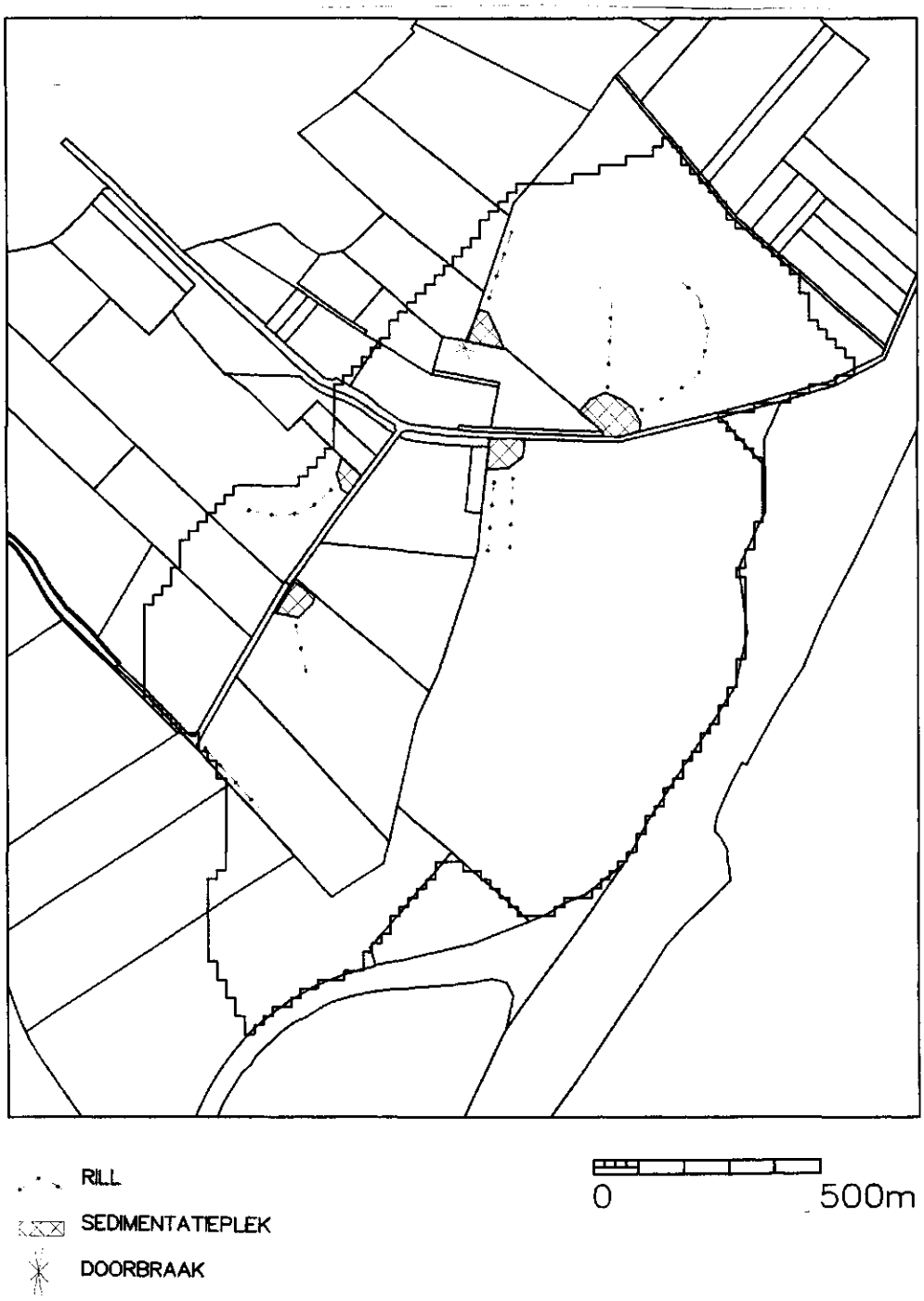


Fig. 3.14 Erosieverschijnselen in het proefgebied Catsop

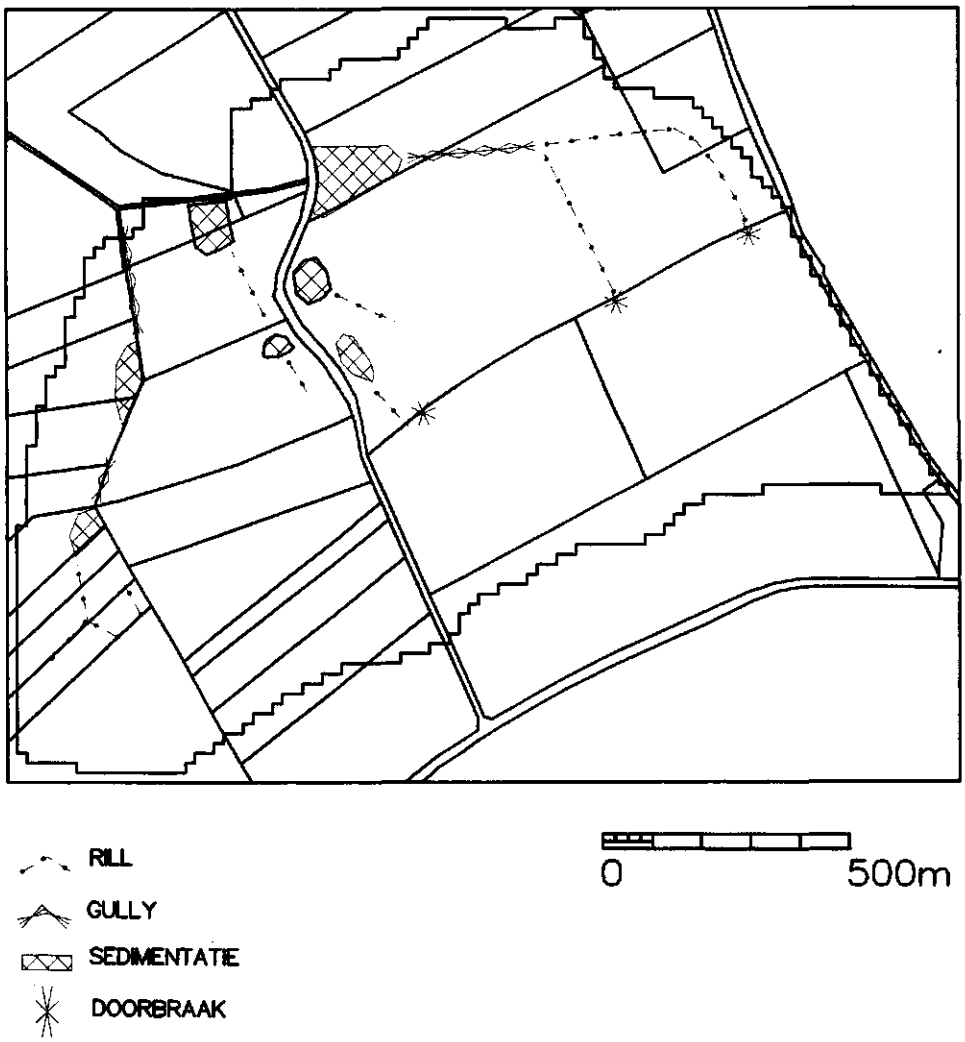


Fig. 3.15 Erosieverschijnselen in het proefgebied St. Gillisstraat

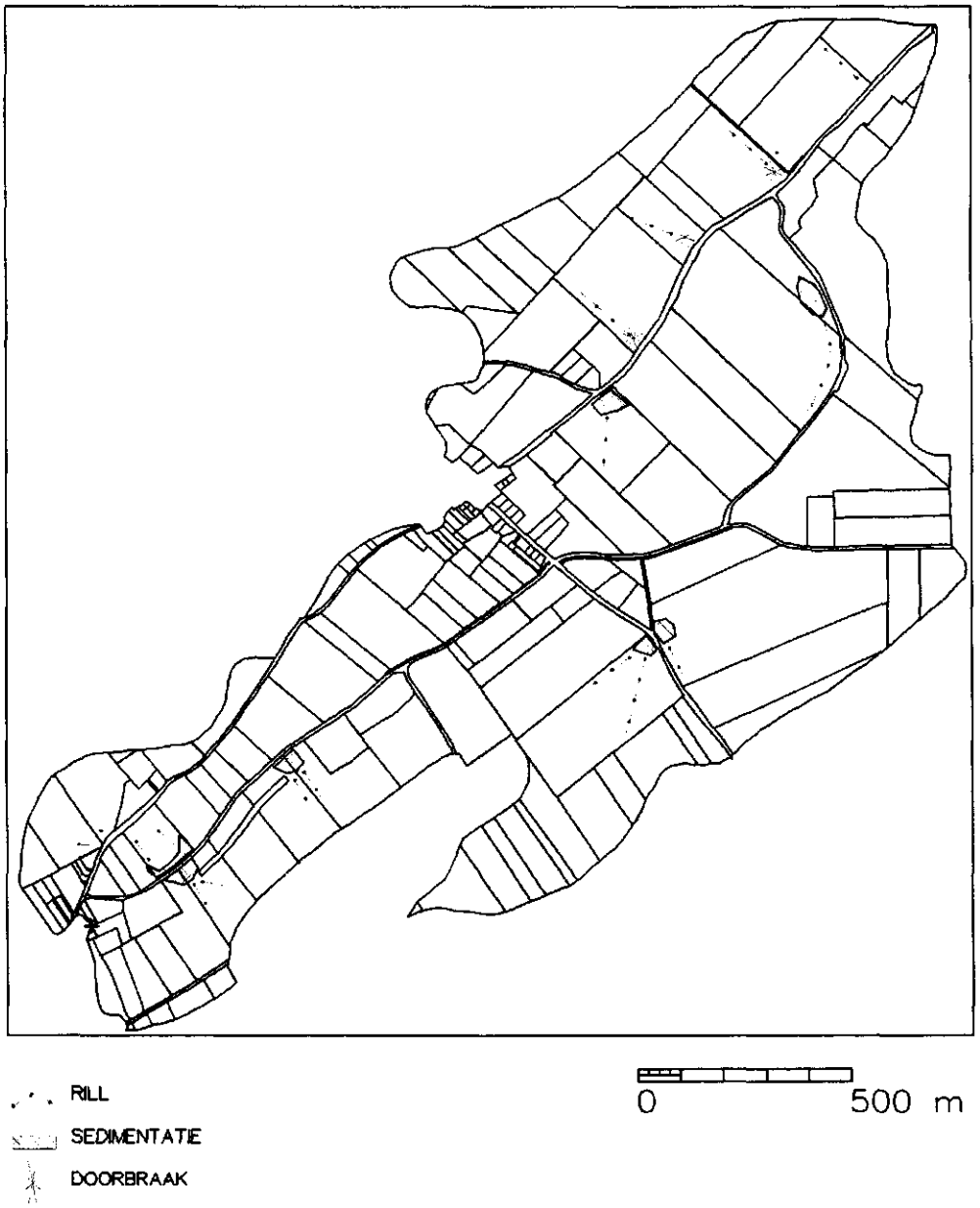


Fig. 3.16 Erosieverschijnselen in het proefgebied Etzenrade

4 Neerslag, water- en sedimentafvoer

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden gegevens van de belangrijkste neerslag- en afvoergebeurtenissen, die binnen het erosienormeringsprojekt zijn verzameld, besproken. Ter illustratie van het detailniveau waarop meetgegevens beschikbaar zijn voor validatie, wordt één afvoer- en erosiegebeurtenis in meer detail gepresenteerd (hoofdstuk 4.2). Deze metingen van neerslag, water- en sedimentafvoer zijn tevens van groot belang om het LISEM-model goed te kunnen valideren. Vooral zware of langdurige regenbuien en buien die een grote totale afvoer of een grote piekafvoer tot gevolg hebben zijn hiervoor geschikt. Daarnaast zijn de gemeten drukhoogtegegevens nodig om het hellinghydrologisch deelmodel te valideren. Deze drukhoogte dient tevens als invoer voor het LISEM-model.

De hoofdstroomgebieden zijn uitvoerig beschreven in hoofdstuk 3. De metingen op dit schaalniveau zijn gestart in februari en april 1992 in resp. Catsop en St. Gillisstraat. In het gebied Etzenrade zijn de metingen, die in 1987 door het Waterschap Roer & Overmaas zijn gestart, gecontinueerd.

In zes substroomgebieden, twee per hoofdstroomgebied, is in het voorjaar van 1992 apparatuur geplaatst voor neerslag- en afvoermetingen. De oppervlaktes van de substroomgebieden zijn berekend uit digitale terreinmodellen van de proefgebieden en staan vermeld in tabel 4.1, evenals het landgebruik op de verschillende percelen gedurende de meetperiode.

Tabel 4.1 Oppervlaktes van de substroomgebieden en geteelde gewassen op de percelen gedurende 1992 en 1993

Stroom-gebied	Oppervlakte (ha)	Winter 91/92	Zomer 92	Winter 92/93	Zomer 93
Catsop 1	3,64	w.tarwe	w.tarwe	w.tarwe	w.tarwe
Catsop 2	5,77	w.tarwe	w.tarwe	gras	aardappel
St. Gillis-straat 1	3,82	boomgaard (permanent)			
St. Gillis-straat 2	4,80	geen	snijmaïs	geen	snijmaïs
		geen	snijmaïs	geen	snijmaïs
		geen	aardappel	geen	s.bieten
		geen	snijmaïs	w.tarwe	w.tarwe
		geen	snijmaïs	w.tarwe	w.tarwe
Etzenrade 1	2,96	g.mosterd	s.bieten	w.tarwe	w.tarwe
Etzenrade 2	9,40	geen	s.bieten	w.tarwe	w.tarwe
		geen	s.bieten	w.tarwe	w.tarwe
		grasland (permanent)			

De drukhoogtemetingen hebben plaatsgevonden op hellingen in vier van deze substroomgebieden namelijk Catsop 2, St. Gillisstraat 1 en 2 en Etzenrade 1. Per

substroomgebied is op drie punten langs een hellingtransect het verloop van de drukhoogte met de diepte bepaald. Ook deze metingen zijn in het voorjaar van 1992 gestart. Voor een beschrijving van de meetmethoden op deze drie schaalniveau's wordt verwezen naar hoofdstuk 2. De metingen in het kader van dit onderzoek zijn in maart 1994 beëindigd.

4.2 Een erosiegebeurtenis in detail

Hieronder wordt de afvoer- en erosiegebeurtenis van 5 juli 1992 in het proefgebied St. Gillisstraat in detail weergegeven om zichtbaar te maken welke gegevens verzameld zijn in het veld ten behoeve van modelvalidatie en hoe de gegevens verwerkt zijn. Er wordt ingegaan op de hellinghydrologie en afvoer in substroomgebied 2 (aangezien hier akkerpercelen aanwezig zijn), en op de afvoer uit het hoofdstroomgebied van St. Gillisstraat.

Op 5 juli 1992 zijn in het stroomgebied St. Gillisstraat twee afvoerproducerende buien gevallen: van 15:05 uur tot 15:21 uur (6,2 mm) en van 18:16 tot 18:54 uur (6,8 mm). Voor aanvang van de eerste bui om 15:00 uur zijn de drukhoogtes bovenin het bodemprofiel (0-10 cm) al relatief hoog (figuur 4.1). Dit komt door neerslag die op 4 juli gevallen is (10 mm).

Bij de meetplek onderaan de helling in substroomgebied 2 is het lössdek slechts 35 cm dik. Op 45 cm - mv bevindt zich mergel met daarboven een 10 cm dikke laag kleefaarde. Uit figuur 4.1 blijkt dat het water er relatief lang over doet om het mergel binnen te dringen, terwijl op 60 cm -mv zelfs helemaal geen water doordringt. Dit heeft tot gevolg dat er boven de mergel 'ophoping' van water plaatsvindt. Bij de meetplekken hoger op de helling is de mergel dieper in het profiel gesitueerd (resp. 140 en 110 cm -mv bij meetplek 1 en 2), met als gevolg dat het regenwater hier dieper infiltreert. De figuur geeft verder aan dat twee uur na de eerste afvoerpiek de bovengrond op de drie meetplekken nog steeds nagenoeg verzadigd is. Dit houdt in dat extra neerslag snel aanleiding kan geven tot plasvorming en eventueel tot oppervlakkige afstroming. Dit wordt bevestigd door de afvoerdata van de tweede bui in het substroomgebied (figuur 4.2a). Afvoer begint al 2 minuten na aanvang van de bui, terwijl de afvoerpiek (18:22 uur) 3 minuten na de piek in de neerslagintensiteit valt (18:19 uur). Figuur 4.2b geeft het verloop van de sedimentconcentratie en de berekende sedimentafvoer. De piek in de sedimentconcentratie valt kort na de piek in de afvoer. De sedimentconcentratie valt snel terug tijdens de afvoerrecessie. Voor het bodemverlies is de staart van de afvoercurve dan ook onbelangrijk. De totale waterafvoer bedraagt 11,1 m^3 en het bodemverlies is ongeveer 300 kg.

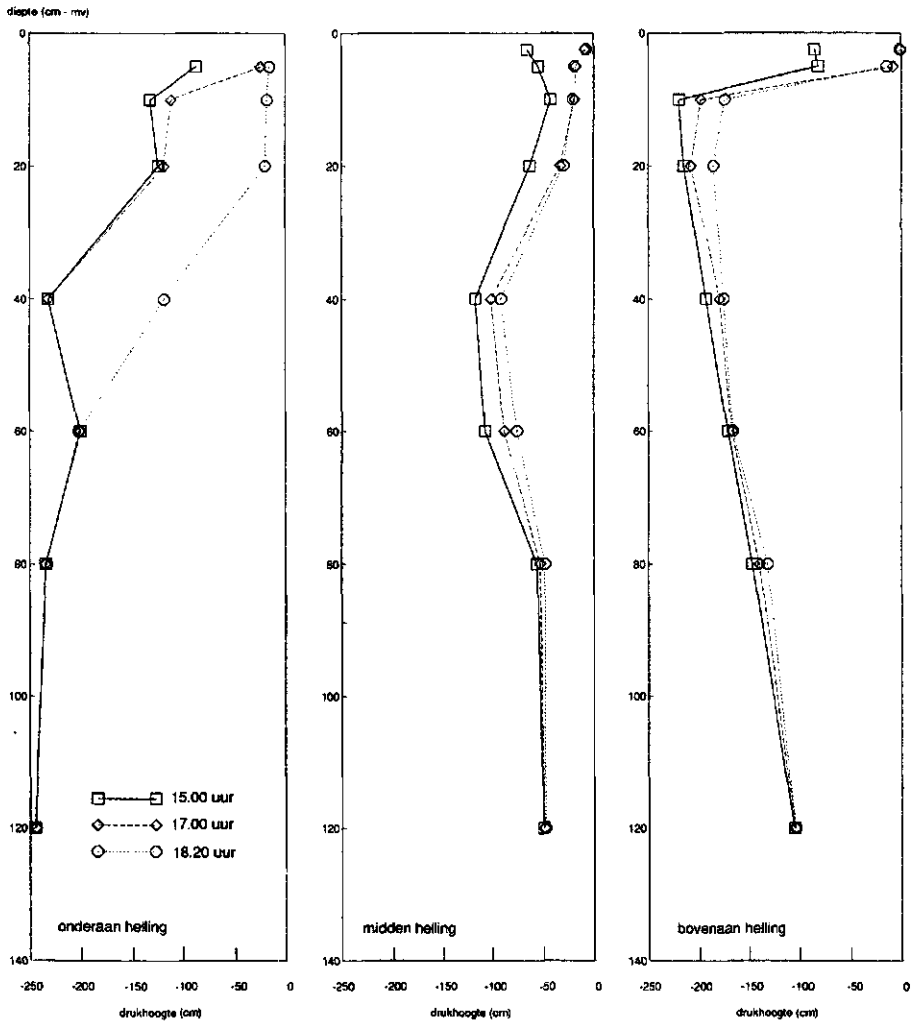


Fig. 4.1 Drukhoogteprofielen op drie tijdstippen van de helling St. Gillisstraat (substroomgebied 2) tijdens de bui van 5 juli 1992. Het eerste tijdstip (15.00 uur) is bij aanvang bui en het laatste tijdstip (18.20 uur) is kort na aanvang van de afvoer bij het uitstroompunt van het substroomgebied als gevolg van een tweede bui. De resultaten zijn metingen met behulp van drie drukhoogtekasten. Bij de kast onderaan de helling waren geen gegevens van 2,5 cm - mv beschikbaar.

Op het hoofdmeetpunt begint de afvoer om 18:20 uur, dat wil zeggen met een vertraging van 2 minuten ten opzichte van het substroomgebied. De afvoerpiek komt 10 minuten later dan de piek in het substroomgebied. Deze vertraging wordt veroorzaakt door het grotere gebiedsoppervlak en de daarmee samenhangende grotere concentratietijd van het water: het water legt een langere weg af. In figuur 4.3 is de afvoercurve weergegeven zoals gemeten op het hoofdmeetpunt. De sediment-concentraties hebben een kleinere range dan die op substroomgebiedsniveau zijn gemeten (9,5 tot 15,2 g/l tegen 0,8 tot 34 g/l). De afvoerpercentages zijn voor het hoofd- en substroomgebied nagenoeg gelijk (resp. 3,2 en 3,4%).

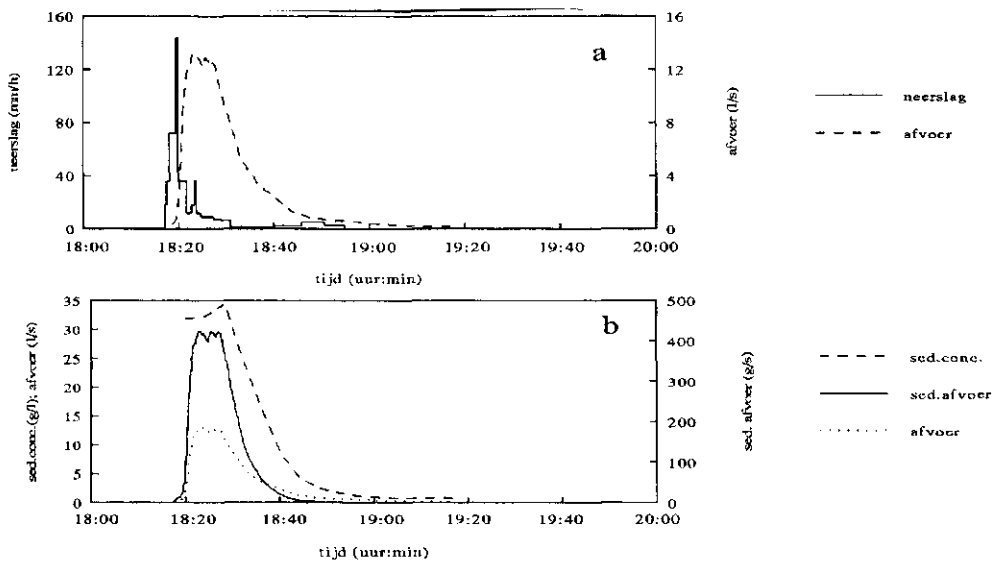


Fig. 4.2 Het verloop van de neerslagintensiteit en waterafvoer (a) en van de sedimentconcentratie (linker y-as) en de sedimentafvoer (rechter y-as) in de tijd (b) tijdens een bui op 5 juli 1992 in substroomgebied 2, St. Gillisstraat

4.3 Metingen in het stroomgebied Catsop

De belangrijkste buien, met herhalingstijden van 1 jaar of meer, die gevallen zijn in het stroomgebied Catsop staan gegeven in tabel 4.2. De herhalingstijden zijn bepaald voor verschillende tijdsintervallen en er wordt onderscheid gemaakt tussen zomer- en winterbuien (Buishand en Velds, 1980; Bouwknegt en Gelok, 1988).

Uit tabel 4.2 blijkt dat er één bui is gevallen met een herhalingstijd die groter is dan de meetperiode namelijk die van 22 januari 1993. Andere uitzonderlijke buien zijn er niet geweest. De belangrijkste zomerbui is die van 30 mei 1993 en treedt gemiddeld eens per twee jaar op (op basis van een interval van 5 en 10 minuten).

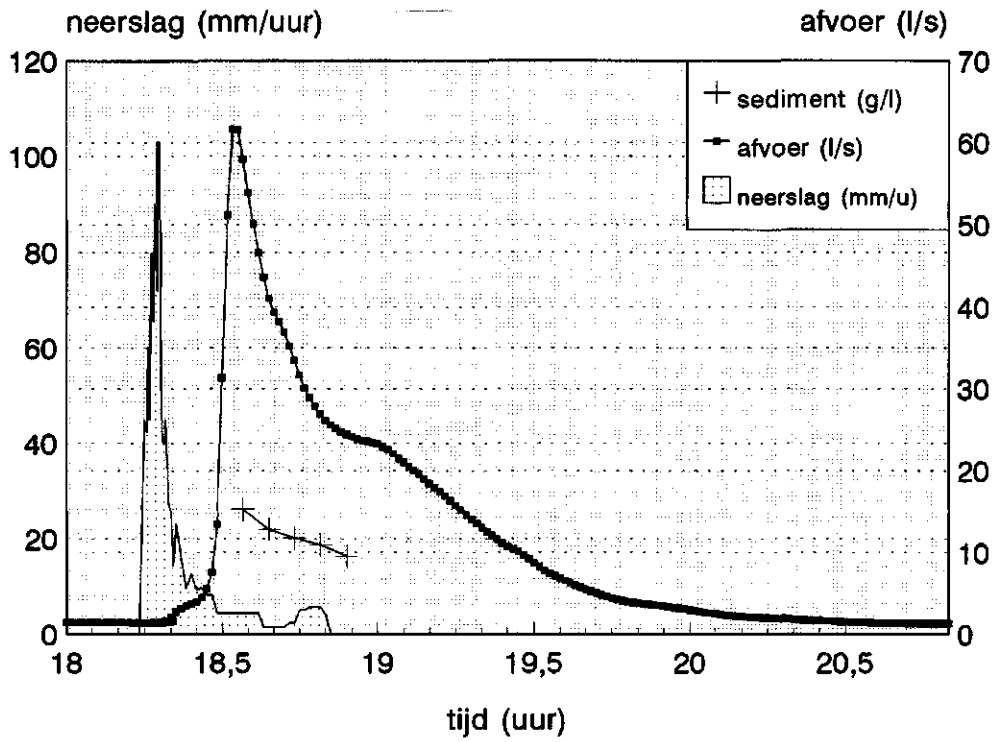


Fig. 4.3 Het verloop van de neerslagintensiteit en water- en sedimentafvoer in de tijd tijdens een bui op 5 juli 1992 in het hoofdstroomgebied St. Gillisstraat

4.3.1 Hoofdstroomgebied Catsop

In tabel 4.3 zijn alle afvoergebeurtenissen weergegeven met een piekafvoer groter dan 25 l/s. Vanaf oktober 1993 zijn alle buien vermeld met een piekafvoer groter dan 50 l/s. In 1992 is op 11 mei de grootste piekafvoer en het grootste percentage oppervlakkige afvoer geregistreerd. Dit was echter niet de bui met de grootste herhalingstijd. Geconcludeerd wordt dat een bui met een bepaalde herhalingstijd nog niets zegt over de herhalingstijd van de afvoer.

Tabel 4.2 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied Catsop

Datum	Interval (min)						
	5	10	15	20	30	45	60
1992							
23 mrt	<1	-	<1	-	<1	<1	1,6
11 aug	1,1	1,3	1,3	1,1	1,3	<1	<1
1993							
22 jan	4,4	-	1,2	-	<1	<1	<1
30 mei	1,9	2,1	<1	<1	<1	<1	<1
19 jul	<1	1,0	<1	<1	<1	<1	<1

Voorbeeld: de maximale hoeveelheid neerslag die gevallen is gedurende een interval van 5 minuten, tijdens de bui van 11 augustus 1992, kan men eens in de 1.1 jaar verwachten; voor een interval van 10 minuten geldt voor dezelfde bui een herhalingstijd van 1.3 jaar.

Tabel 4.3 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied Catsop

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag (mm)	Kin. energie (J/m^2)	Afvoer[1]		Piek-afvoer (l/s)	Afvoer perc. (%)	Nr[4]
	begin	eind			beneden (m^3)	boven (m^3)			
1992									
23 mrt	13:49	15:56	18,2	243	39	100	28	2,7	0
11 mei	15:42	16:15	4,0	84	8	45	61	3,3	4
4 jun[2]	3:45	4:45	-	-	14	19	32	-	-
5 jun[2]	18:30	21:15	-	-	31	57	38	-	-
5 jul[2]	18:15	21:30	-	-	32	96	57	-	-
11 aug	16:13	16:49	13,4	338	18	57	26	1,4	9
1993									
11 jan	12:53	14:44	4,8	80	52	86	31	6,9	9
12 jan	1:15	8:44	14,0	220	105	278	30	6,6	0
22 jan	16:30	18:30	11,8	229	215	218	96	8,8	16
30 mei	14:32	14:42	9,4	264	14	254	344	6,9	5
30 mei	15:46	16:03	4,8	117	19	81	93	5,0	7
14 okt	3:00	8:00	18,4	320	88	558	155[3]	9,9	24
13 dec	6:15	9:15	7,2	128	79	160	69	8,1	24

[1] afvoer beneden, boven: cumulatieve afvoer bij waterhoogten in de meetgoot van resp. beneden en boven 4.6 cm.
[2] verstopte regenmeter, geen (beperkte) registraties van neerslag, afvoer en sedimenttransport.
[3] werkelijke piekafvoer groter als gevolg van een verstopping in de meetapparatuur.
[4] nr: aantal sedimentmonsters.

De afvoerpercentages van de regenbuien op 23 maart en 11 mei (1992) duiden er op dat de oppervlakkige afvoer niet alleen afkomstig is van het verhard oppervlak (0.82%). Op 23 maart is de grootste cumulatieve afvoer geregistreerd van alle regenbuien in 1992. De cumulatieve afvoer beneden de meetnauwkeurigheid dient voorzichtig geïnterpreteerd te worden. De afvoer in dit traject wordt waarschijnlijk overschat. De gemeten sedimentgehaltes varieerden gedurende de afvoergebeurtenis

van 11 mei tussen 9.8 en 38.6 g/l. Gedurende de afvoergebeurtenis op 11 augustus varieerden de sedimentgehaltes van 3.2 tot 4.3 g/l.
In 1993 zijn op 30 mei en 14 oktober de grootste piekafvoeren gemeten. Afvoergebeurtenissen met een piekafvoer tussen 50 en 100 l/s zijn geregistreerd op 22 januari en 13 december 1993. In de winter is de bodem voor een groot deel verzadigd met water, waardoor een geringe hoeveelheid neerslag reeds oppervlakkige afvoer tot gevolg heeft. Dit komt mede tot uiting in de grote cumulatieve afvoer. Op 30 mei is in Catsop de grootste afvoergebeurtenis in de gehele meetperiode geregistreerd (344 l/s). Het afvoerpercentage van de regenbui is veel groter dan het percentage verhard oppervlak en vergelijkbaar met de hoge afvoerpercentages van de grotere regenbuien in de winter. De sedimentgehaltes varieerden gedurende de afvoergebeurtenis op 11 januari van 4,5 tot 12,7 g/l en op 22 januari van 4,6 tot 36,4 g/l. Op 30 mei en 14 oktober varieerden de sedimentgehaltes respectievelijk van 30,6 gram tot 130,5 gram en van 14,9 gram tot 53,0 gram.

4.3.2 Substroomgebied 1, Catsop

In substroomgebied 1 van Catsop is gedurende de gehele meetperiode geen afvoer opgetreden. Op het belangrijkste perceel in dit stroomgebied is alleen wintertarwe geteeld gedurende de meetperiode. Op de akker is na de oogst een stoppelbewerking uitgevoerd.

4.3.3 Substroomgebied 2, Catsop

Dit substroomgebied bestaat uit één groot perceel. Hier is in 1992 wintertarwe geteeld en is na de oogst daarvan gras ingezaaid. Gedurende deze periode is geen afvoer van betekenis gemeten, ook niet tijdens de belangrijke winterbui van 22 januari 1993.

In 1993 is tijdens het groeiseizoen (aardappelgewas) en de daarop volgende winter (geen gewas, najaarsbewerking) erosie opgetreden (tabel 4.4 en 4.5). De hoogste piekafvoer is gemeten op 30 mei 1993 tijdens een korte hevige bui. De grootste afvoerhoeveelheden zijn echter gemeten in het najaar van 1993 tijdens langdurige buien met lagere intensiteiten. De afvoerpercentages nemen in deze periode toe tot bijna 60% op 14 oktober. De verzamelde sedimentmonsters (tabel 4.5) geven aan dat de sedimentconcentraties van de afvoer sterk kunnen verschillen als functie van de buikarakteristieken en de toestand van het bodemoppervlak en gewasbedekking. Zo is het bodemverlies op 3 september groter dan op 14 november terwijl de hoeveelheid afvoer zeven maal kleiner was. Dit wordt vooral veroorzaakt door de grotere neerslagintensiteit en de hogere piekafvoer op 3 september.

Tabel 4.4 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, Catsop

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag	Max. 5 min.int.[3]	Afvoer[2]		Piek-afvoer	Afvoer perc.
	begin	eind	(mm)	(mm/h)	beneden (m^3)	boven (m^3)	(l/s)	(%)
1993								
30 mei[1]	14:32	14:42	9,6	80,0	0,3	>160,6	>309,0	>29,0
30 mei	15:46	16:03	5,0	38,4	0,3	47,3	64,9	16,4
19 jul	22:46	0:16	12,6	55,2	1,1	19,0	28,5	2,6
22 jul	11:08	12:07	6,4	36,7	1,6	3,1	4,7	0,8
3 sep	12:41	12:57	6,8	60,0	0,2	25,7	38,5	6,6
3 sep	15:00	15:10	2,6	26,5	0,2	2,8	2,5	1,9
9 sep	14:13	15:40	7,4	8,5	0,8	3,6	2,5	0,8
13 sep	6:33	11:07	8,8	7,6	5,3	3,3	2,7	0,6
14 sep	14:12	16:18	6,6	8,5	4,7	4,6	2,0	1,2
16 sep	4:14	5:30	3,6	24,5	3,0	4,6	5,9	2,2
22 sep	9:14	9:32	4,4	31,3	2,8	9,4	6,3	3,7
25 sep	-	-	>20,4	-	4,8	217,8	11,3	18,5
26 sep	11:18	19:00	18,2	5,6	3,1	56,9	10,0	5,4
14 okt	3:13	9:47	18,8	16,8	0,1	641,3	122,4	59,1
14 nov	15:59	22:51	12,2	3,8	0,1	176,6	5,5	25,1

[1] hoeveelheden niet betrouwbaar vanwege overschrijding van het meetbereik van de H-flume.
[2] afvoer beneden, boven: cumulatieve afvoer bij debieten resp. beneden en boven 0.5 l/s.
[3] maximale 5-minuten intensiteit.

Tabel 4.5 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, Catsop

Datum	Neer-slag (mm)	Max. 5 min.int. (mm/h)	Afvoer (m^3)	Piek-afvoer (l/s)	Bodem-verlies (kg)	Sedimentconc. gem. (g/l)	range (g/l)	Nr[1]
1993								
19 jul	12,6	55,2	20,1	28,5	217,2	10,9	5-15	5
22 jul[2]	6,4	36,7	4,7	4,7	15,5	3,2	3- 4	2
3 sep	6,8	60,0	25,9	38,5	1056,4	40,8	13-65	6
9 sep[2]	7,4	8,5	4,4	2,5	89,6	19,4	18-20	2
13 sep[2]	8,8	7,6	8,6	2,7	154,5	18,0	17-19	2
16 sep[2]	3,6	24,5	7,6	5,9	165,7	21,9	19-25	2
14 nov	12,2	3,8	176,7	5,5	915,3	4,8	4-18	24

[1] nr: aantal sedimentmonsters
[2] sedimentgegevens slechts indicatief i.v.m. gering aantal monsters.

4.4 Metingen in het stroomgebied St. Gillisstraat

In het stroomgebied St. Gillisstraat zijn alleen in de winterperiode een aantal grote buien gevallen, namelijk op 25 oktober 1992 en op 22 januari en 30 december 1993 (tabel 4.6). De drie zomerbuien vermeld in tabel 4.6 hebben allen herhalingstijden van minder dan 2 jaar.

Tabel 4.6 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied St. Gillisstraat

Datum	Interval (min)						
	5	10	15	20	30	45	60
1992							
5 jun	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1,2
5 jul	1,1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
25 okt	2,7	-	4,9	-	4,9	6,2	5,5
1993							
22 jan	4,6	-	2,6	-	1,7	1,8	1,8
19 jul	1,4	1,2	<1	<1	<1	<1	<1
30 dec	<1	-	1,2	-	1,3	1,2	1,8

4.4.1 Hoofdstroomgebied, St. Gillisstraat

In St. Gillisstraat zijn in 1992 slechts twee afvoergebeurtenissen geregistreerd met een piekafvoer groter dan 25 l/s (tabel 4.7). Uit de afvoerpercentages blijkt dat de oppervlakkige afvoer gedurende de regenbuien niet alleen afkomstig is van het verhard oppervlak. Het verhard oppervlak bedraagt 0.43% in St. Gillisstraat. De sedimentgehaltes varieerden gedurende de afvoergebeurtenis op 20 juni van 9,3 tot 17,6 g/l en op 5 juli van 9,5 tot 15,2 g/l.

Tabel 4.7 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied St. Gillisstraat

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag (mm)	Kin. energie (J/m^2)	Afvoer		Piek-afvoer (l/s)	Afvoer perc. (%)	Nr
	begin	eind			beneden (m^3)	boven (m^3)			
1992									
20 jun	19:31	21:58	20.8	433	18	170	39	2.1	10
5 jul	18:13	18:46	7.4	183	13	88	62	3.2	3
1993									
11 jan	13:18	15:03	3.4	51	30	216	33	16.9	4
11 jan[1]	0.00	24:00	17.8	239	103	375	33	6.3	3
12 jan	1:31	9:52	22.0	127	60	1930	127	21.1	0
13 jan	21:34	22:02	3.6	75	17	47	33	4.1	0
22 jan[2]	17:12	18:36	11.0	247	34	383	300	4.2	21
22 sep	3:00	9:30	17.4	422	37	114	79	2.1	24
14 okt	11:00	15:30	11.0	177	14	607	77	13.7	5
14 nov	0:00	4:00	9.4	158	118	175	96	7.6	19
30 dec[2]	10:00	1:45	27.4	488	54	2420	765	22.0	5
1994									
2 jan	4:00	13:30	10.6	147	116	989	135	25.4	0
3 jan	14:00	20:30	6.4	94	118	437	165	21.2	0

[1] dagtotaal van 11 januari.
[2] schatting van piekafvoer (lijn van hoogste waterstand in meetgoot) i.v.m. een verstopping in de meetgoot. De cumulatieve afvoer wordt vermoedelijk onderschat.

In 1993 is een groot aantal afvoergebeurtenissen met een piekafvoer groter dan 25 l/s geregistreerd. Vanaf oktober 1993 tot en met januari 1993 zijn alleen afvoergebeurtenissen met een piekafvoer groter dan 75 l/s weergegeven. Op 22 januari 1993 en 30 december 1993 zijn de grootste piekafvoeren waargenomen; deze zijn echter

geschat. Deze afvoergebeurtenissen zijn daardoor slechts voor een deel bruikbaar bij de validatie van het LISEM-model. Opvallend zijn de grote totale afvoeren van regenbuien in de wintermaanden december en januari. In deze periode heeft als gevolg van een grote mate van verzadiging van de bodem met water veel afvoer plaatsgevonden. Als gevolg van de verzadigde bodemcondities is de afvoer die gemeten wordt gedurende een regenbui ook voor deel het gevolg van voorafgaande regenbuien. De antecedente vochtcondities hebben een grote invloed op de cumulatieve afvoer en op de afvoerpercentages op het moment van het optreden van een regenbui.

De sedimentgehaltes tijdens de afvoergebeurtenissen op 11 en 22 januari 1993 vertonen een overeenkomstig beeld met de sedimentgehaltes gemeten te Catsop. Op 11 januari varieerden de sedimentgehaltes tussen 3.8 tot 10.2 g/l en op 22 januari tussen 2.5 en 63.1 g/l. Op 22 september, 14 oktober en 14 november 1993 zijn drie reeksen watermonsters genomen. De sedimentgehaltes gedurende deze drie afvoergebeurtenissen waren vergelijkbaar en varieerden van 6,3 tot 26,6 g/l. De sedimentgehaltes gedurende de regenbui op 30 december zijn groot en variëren van 21,9 tot 103,6 g/l.

4.4.2 Substroomgebied 1, St. Gillisstraat

Dit substroomgebied bevindt zich in een boomgaard waarvan de bodem met gras begroeid is. Door het ontbreken van bodembewerking is, naast de neerslagkarakteristiek, in dit substroomgebied het bodemvochtgehalte de belangrijkste afvoerbepalende variabele. De afvoergebeurtenissen zijn weergegeven in tabel 4.8.

Tabel 4.8 Afvoerregistraties in substroomgebied 1, St. Gillisstraat

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag (mm)	Max. 5 min.int. (mm/h)	Afvoer		Piek-afvoer (l/s)	Afvoer perc. (%)
	begin	eind			beneden (m^3)	boven (m^3)		
1992								
5 jun	17:13	20:05	23	36,0	0,3	15,6	6,1	1,8
20 jun	7:13	8:10	8	22,7	0,2	3,6	3,5	1,2
20 jun	19:34	0:56	29	27,5	0,2	19,6	5,6	1,8
4 jul	18:27	19:08	10	52,0	0,1	3,1	2,9	0,8
5 jul	15:07	18:42	15	66,7	0,0	10,5	14,4	1,8
17 jul	19:48	21:21	10	25,7	0,1	4,1	3,6	1,1
13 aug	14:14	18:31	12	15,6	0,5	2,3	1,8	0,6
25 okt	17:51	22:40	21	47,6	0,2	26,7	20,4	3,4
17 nov	2:43	11:19	20	4,6	2,3	3,9	0,9	0,8
1993								
12 jan	1:29	9:50	26	5,4	0,4	28,4	3,9	2,9
22 jan	17:14	19:09	12	48,0	0,1	2,7	1,6	0,6
22 sep	7:31	9:31	11	?	0,1	8,4	11,3	2,0
14 nov	16:06	0:28	18	10,0	0,2	8,0	1,8	1,2
21 dec	1:39	1:54	4	17,9	0,3	2,2	1,7	1,6
21 dec	10:47	14:47	10	5,4	0,5	6,3	1,3	1,8
30 dec	17:24	1:50	25	31,9	0,5	63,8	16,0	6,7

Gedurende de zomer van 1993 is nauwelijks afvoer gemeten. De afvoerpercentages zijn over het geheel genomen laag (minder dan 2%). De buien van 25 oktober 1992 en van 22 januari en 30 december 1993, dit zijn allen buien met grotere herhalingstijden (zie tabel 4.5), geven iets hogere afvoerpercentages te zien. Toch blijft ook in de winterperiode de afvoer beperkt in vergelijking met substroomgebied 2. Verzadigings-overlandflow speelt hier geen grote rol. Hoge piekafvoeren treden niet op, mede doordat het gras de snelheid van het afstromende water beperkt. De aanwezigheid van het gras is ook de oorzaak van de zeer lage sedimentgehaltes van het afstromende water (meestal minder dan 1 g/l; tabel 4.9). Het bodemverlies in dit substroomgebied is dan ook verwaarloosbaar. De afvoerpercentages in de zomer laten zich goed vergelijken met die van substroomgebied 2 in St. Gillisstraat waarin zich alleen akkerpercelen bevinden (hoofdstuk 4.4.3). In de winter zijn de afvoerpercentages veel lager. Ondanks de compacte bovengrond in de boomgaard zijn de infiltratriemogelijkheden voor het regenwater groot. Hierbij spelen vermoedelijk biogene macroporiën een rol. Daarbij treedt dieper in het bodemprofiel minder stagnatie van water op dan in substroomgebied 2 het geval is. Dit is vooral van belang voor de afvoer in de winterperiode. Op grond van de verzamelde meetgegevens, inclusief de bodemfysische metingen, kan niet gesteld worden dat de aanwezigheid van deze laagstamboomgaard een belangrijke oorzaak is van de erosieproblemen in de hellingafwaarts van de boomgaard gelegen akkers. Zeker draagt het water dat de boomgaard verlaat bij aan de rillvorming in de aangrenzende akkers (figuur 3.16). Vermoedelijk is echter veel water dat via deze rills wordt afgevoerd afkomstig van de akkerpercelen zelf.

Tabel 4.9 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 1, St. Gillisstraat

Datum	Neer-slag (mm)	Max. 5 min.int. (mm/h)	Afvoer (m^3)	Piek-afvoer (l/s)	Bodem-verlies (kg)	Sedimentconc. gem. (g/l)	range (g/l)	Nr
1992								
5 jun	23	36,0	15,9	6,1	7,2	0,45	0,7-2,2	22
20 jun	8	22,7	3,8	3,5	3,6	0,95	0,3-2,4	9
20 jun	29	27,5	19,8	5,6	11,7	0,59	0,6-0,9	6
5 jul	15	66,7	10,7	14,4	18,4	1,72	0,5-4,4	7
17 jul	10	25,7	4,3	3,6	2,2	0,51	0,3-0,8	6
13 aug	12	15,6	2,8	1,8	0,9	0,31	0,2-0,4	3

4.4.3 Substroomgebied 2, St. Gillisstraat

In dit substroomgebied bevinden zich een aantal akkerpercelen (tabel 4.1). Erosie is opgetreden in de zomer van 1992, maar vooral in beide winters. In de zomer van 1992 is het hoogst gemeten afvoerpercentage 3,4% (5 juli). De situatie in het najaar/winter wordt gekenmerkt door veel hogere afvoeren die ook optreden bij buien met lage intensiteiten (tabel 4.10). Vaak zijn dit intensiteiten die lager zijn dan de te verwachten verzadigde waterdoorlatendheid van löss.

Tabel 4.10 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, St. Gillisstraat

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag	Max. 5 min.int.	Afvoer		Piek-afvoer	Afvoer perc.
	begin	eind	(mm)	(mm/h)	beneden (m^3)	boven (m^3)	(l/s)	(%)
1992								
5 jun	17:11	20:06	19,8	31,8	1,7	4,1	2,1	1,8
4 jul	18:25	18:43	5,8	38,2	0,2	3,4	5,5	1,3
5 jul	15:05	15:21	6,2	57,2	0,4	5,1	10,1	1,8
5 jul	18:16	18:54	6,8	48,7	0,3	10,8	13,2	3,4
17 jul	20:01	21:28	7,4	10,3	0,2	2,7	2,6	0,8
13 aug	14:05	6:05	22,6	17,9	0,2	0,6	1,0	0,1
17 nov	5:47	11:55	16,8	5,4	0,6	157,0	15,8	19,5
22 nov	0:23	4:24	4,4	4,1	0,7	24,2	6,5	11,8
2 dec	16:02	1:54	8,4	15,1	0,3	97,9	35,9	24,4
4 dec	10:54	15:14	10,4	8,4	0,1	144,7	20,9	29,0
11 dec	16:51	8:54	18,4	4,0	2,5	210,0	18,2	24,1
1993								
11 jan	9:42	15:02	12,8	7,9	0,0	51,5	4,4	8,4
12 jan	0:51	9:54	23,2	6,0	1,4	254,6	16,8	23,0
13 jan	21:36	22:04	4,0	19,1	0,7	23,1	8,2	12,4
22 jan	17:14	18:37	11,6	52,8	0,5	527,3	202,8	94,6
19 jul	16:23	16:51	8,4	57,6	0,1	0,9	3,3	0,2
25 jul	14:22	15:57	10,8	28,8	0,2	1,5	1,9	0,3
30 dec	21:54	1:48	19,2	31,9	0,2	159,5	13,6	17,3

In verband met onderspoeling van de meetgoot is een deel van de meetgegevens van de winterperiode 1993/94 onbetrouwbaar.
De hoge afvoerpercentages (tot meer dan 25%) bij buien met lage intensiteiten geven aan dat er sprake is van verzadigingsoverlandflow in de winterperiode. Hierbij speelt de aanwezigheid van de mergel en kleefaarde op geringe diepte een grote rol (zie ook hoofdstuk 4.2). De grote afvoerhoeveelheden hangen hier samen met stagnatie van water op de overgang naar de mergel en de opbouw van een schijngrondwaterspiegel. In de zomerperiode krijgt dit proces veel minder kans doordat het bodemprofiel minder vocht bevat en dus meer neerslag kan bergen voordat verzadigingsoverlandflow kan ontstaan.

Tabel 4.11 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, St. Gillisstraat

Datum	Neer-slag (mm)	Max. 5 min.int. (mm/h)	Afvoer (m^3)	Piek-afvoer (l/s)	Bodem-verlies (kg)	Sedimentconc. gem. (g/l)	range (g/l)	Nr
1992								
5 jun	19,8	31,8	5,9	2,1	418,7	70,1	13 - 238	24
4 jul	5,8	38,2	3,6	5,5	149,5	42,3	8,3 - 25	6
5 jul	6,2	57,2	5,4	10,1	149,8	27,7	1,9 - 33	9
5 jul	6,8	48,7	11,1	13,2	291,4	26,3	0,8 - 34	12
17 jul	7,4	10,3	2,9	2,6	21,0	7,4	1,6 - 13	7
13 aug	22,6	17,9	1,1	1,0	4,6	4,3	1,7 - 7	5
22 nov	4,4	4,1	24,9	6,5	167,0	6,7	1,2 - 19	24
2 dec	8,4	10,4	98,3	35,9	3457,2	35,2	6,4 - 107	20
11 dec	18,4	4,0	213,0	18,2	716,3	3,6	1,9 - 5	24
1993								
13 jan	4,0	19,1	24,0	8,2	612,2	25,5	2,0 - 118	14
22 jan	11,6	52,8	528,3	202,8	27981,6	53,0	2,0 - 165	24

De belangrijkste afvoergebeurtenis is die van 22 januari 1993. Het afvoerpercentage van deze winterbui met hoge neerslagintensiteit bedraagt bijna 95%. Het berekende bodemverlies van deze ene gebeurtenis bedraagt bijna 28 ton, d.w.z. ongeveer 5,6 ton/ha.

De sedimentconcentraties van het afstromende water in substroomgebied 2 van St. Gillisstraat veranderen sterk in de loop van het jaar (tabel 4.11). Vroeg in het groeiseizoen (5 juni 1992) wordt met weinig water zeer veel bodemmateriaal meegenomen. De verhouding sedimentconcentratie/debiet neemt gedurende de zomer steeds meer af. Dit wordt veroorzaakt door:

— een toename van de weerstand van het bodemoppervlak tegen erosie door compactie en korstvorming in de loop van het groeiseizoen
— een afname van de effectieve kinetische energie van de neerslag als gevolg van toenemende gewasbedekking.

In de winterperiode wordt de sedimentconcentratie voor een belangrijk deel bepaald door het debiet. Bij hogere piekafvoeren worden hogere concentraties gemeten (tabel 4.11).

4.5 Metingen in het stroomgebied Etzenrade

In het stroomgebied Etzenrade zijn vrijwel alle belangrijke buien in de zomer gevallen (tabel 4.12). De bui van 12 mei 1993 is wat betreft de herhalingstijd de belangrijkste geregistreerde bui. Echter, deze is slechts in een klein gedeelte van het stroomgebied gevallen, helemaal bovenstrooms bij de substroomgebieden. Voor het gehele stroomgebied is de belangrijkste zomerbui die van 8 juni 1992. Bij een interval van 20 minuten blijkt de maximale hoeveelheid neerslag gedurende deze bui gemiddeld een maal per anderhalf jaar voor te komen. Uit de herhalingstijden blijkt dat alle geregistreerde winterbuien meerdere malen per jaar voorkomen, met uitzondering van de regenbui op 14 oktober 1993.

Tabel 4.12 Herhalingstijden in jaren (groter of gelijk aan 1 jaar) van buien geregistreerd in het stroomgebied Etzenrade

Datum	interval(min)						
	5	10	15	20	30	45	60
1992							
8 jun	<1	<1	1,0	1,5	1,2	<1	<1
5 jul	1,4	1,1	<1	<1	<1	<1	<1
28 aug	1,4	<1	<1	<1	<1	<1	<1
1993							
12 mei[1]	<1	1,6	1,5	1,8	2,6	4,0	4,5
21 jul	2,4	2,0	1,8	1,9	1,5	1,0	<1
14 okt	<1	-	<1	-	<1	1,0	2,7

[1] Deze belangrijke bui is alleen gevallen in het bovenstroomse deel van het stroomgebied, daar waar de substroomgebieden gelegen zijn.

4.5.1 Hoofdstroomgebied, Etzenrade

In tabel 4.13 zijn alle afvoergebeurtenissen weergegeven met een piekafvoer groter dan 75 l/s (vanaf oktober 1993 groter dan 125 l/s). In 1992 is de grootste piekafvoer geregistreerd gedurende een regenbui op 8 juni. De grootste totale afvoer tijdens een regenbui is opgetreden op 17 november. Met uitzondering van de regenbui op 11 november zijn de percentages van de oppervlakkige afvoer beduidend groter dan het percentage verhard oppervlak. Het verhard oppervlak bedraagt 1,22% in Etzenrade. Watermonsters ter bepaling van het sedimentgehalte zijn met de hand genomen gedurende twee afvoergebeurtenissen. Bij de regenbui op 8 juni varieerden de sedimentgehaltes tussen 4,7 en 21,6 g/l. Gedurende de afvoergebeurtenis op 5 juli varieerden de sedimentgehaltes van 8,2 tot 11,55 g/l.

Tabel 4.13 Belangrijkste afvoerregistraties in hoofdstroomgebied Etzenrade

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag	Kin. energie	Afvoer	Piek-afvoer	Afvoer perc.	Nr
	begin	eind	(mm)	(J/m^2)	(m^3)	(l/s)	(%)	
1992								
8 jun	14:35	17:15	18,0	398	1605	462	3,9	21
5 jul	15:56	18:31	18,6	477	1175	337	2,8	12
25 okt	12:18	16:36	12,2	229	740	121	2,7	0
11 nov	8:35	15:10	9,0	123	388	232	1,6	0
17 nov	7:55	13:40	17,0	272	1840	164	4,8	0
1993								
11 jan	8:20	14:55	10,4	155	815	77	3,5	0
12 jan	1:50	9:47	16,6	254	1120	79	3,0	0
22 jan	16:37	18:31	8,4	168	435	94	2,3	0
21 jul	13:50	17:05	7,6	145	1350	174	7,9	12
14 okt[1]	0:00	24:00	51,0	859	5060	550	4,4	0
13 dec[1]	0:00	24:00	14,0	217	4775	153	15,0	0
30 dec	22:00	1:45	10,0	169	3876	284	17,9	0

[1] dagtotalen

In 1993 zijn in Etzenrade in januari een aantal regenbuien gemeten die een piekafvoer tussen 75 en 100 l/s veroorzaakten. Op 21 juli is een piekafvoer van 174 l/s geregistreerd. De grootste piekafvoer in 1993 (550 l/s) is gemeten op 14 oktober. In december 1993 is veel neerslag gevallen waarbij de grootste piekafvoer is geregistreerd op 13 en 30 december. Het afvoerpercentage van alle getabelleerde regenbuien in 1993 is groter dan het percentage verhard oppervlak. Tijdens de afvoergebeurtenissen op 21 juli zijn watermonsters genomen. De sedimentgehaltes varieerden van 0,8 tot 10,7 g/l.

4.5.2 Substroomgebied 1, Etzenrade

In de substroomgebieden van Etzenrade zijn een aantal grote buien gevallen. Desondanks is in substroomgebied 1 gedurende de meetperiode geen afvoer geweest. Veldwaarnemingen tonen aan dat binnen het gebied wel bodemmateriaal verplaatst is. Dit materiaal is echter binnen het gebied weer geborgen, waarbij georiënteerde ruwheid als gevolg van grondbewerking een belangrijke rol heeft gespeeld. Daarbij

is het een relatief klein substroomgebied van nog geen 3 ha, waardoor de hoeveelheden water die zich in het lage gedeelte van het gebied verzamelen beperkt blijven.

Tabel 4.14 Afvoerregistraties in substroomgebied 2, Etzenrade

Datum	Tijd (bui)		Neer-slag	Max. 5 min.int.	Afvoer		Piek-afvoer	Afvoer perc.
	begin	eind	(mm)	(mm/h)	beneden (m^3)	boven (m^3)	(l/s)	(%)
1992								
4 jun	1:45	10:52	22	16,7	0,8	3,0	5,5	0,2
5 jun	17:58	20:00	13	12,6	1,5	23,0	6,8	2,0
8 jun	9:54	11:35	10	31,0	0,3	23,0	27,6	2,5
8 jun	14:35	17:14	18	55,3	0,7	58,6	64,7	3,9
5 jul	16:04	19:21	19	72,0	1,0	21,3	9,0	1,3
28 aug	23:41	9:23	14	71,5	0,1	0,3	0,9	0,0
31 aug	18:13	1:31	22	27,8	0,8	18,9	8,9	1,0

Er is ook waterafvoer opgetreden op 25 okt, 29 okt en 11 nov 1992. De hoeveelheden zijn onbekend i.v.m. verwijdering van de watergeleidingsschotten t.b.v. de suikerbietenoogst.

4.5.3 Substroomgebied 2, Etzenrade

In substroomgebied 2 (9,4 ha) is alleen erosie opgetreden in 1992 in de periode dat er een suikerbietengewas op de twee belangrijkste percelen stond tot aan het moment van de najaarsbewerking. Vanaf de inzaai van de wintertarwe in december 1992 is geen afvoer meer opgetreden, ook niet tijdens de belangrijkste bui die in de substroomgebieden is gevallen op 12 mei 1993. De grootste afvoer is gemeten op 8 juni 1992. Het afvoerpercentage was 3,9%. De sedimentgehaltes van de afvoer (tabel 4.15) waren hoog in juni (tot 129 g/l) en namen sterk af in de loop van het groeiseizoen (tot minder dan 1 g/l). In dit substroomgebied is gemeten tot half augustus 1993.

Tabel 4.15 Sedimentafvoerregistraties in substroomgebied 2, Etzenrade

Datum	Neer-slag (mm)	Max. 5 min.int. (mm/h)	Afvoer (m^3)	Piek-afvoer (l/s)	Bodem-verlies (kg)	Sedimentconc. gem. (g/l)	range (g/l)	Nr
1992								
4 jun	22	16,7	3,8	5,5	176,1	46,8	44- 58	3
5 jun	13	12,6	24,5	6,8	274,7	11,2	9- 29	16
8 jun[1]	10	31,0	23,3	27,6	1077,1	45,9	5-129	21
5 jul	19	72,0	22,3	9,0	133,5	6,0	0,4- 18	22
31 aug	22	27,8	19,7	8,9	7,4	0,4	0,1- 0,8	14

[1] de eerste, kleinste afvoergebeurtenis van 8 juni 1992; zie tabel 4.14

4.6 Conclusies

Neerslag
De neerslaghoeveelheden gedurende een regenbui kunnen vooral in de zomer lokaal sterk variëren. Van de regenbuien geregistreerd in de zomer is 5 juli 1992 de enige bui die gelijktijdig in de drie stroomgebieden is gevallen en die een aanzienlijke afvoer opleverde. Uit de herhalingstijden van alle regenbuien in de zomer in de drie hoofdstroomgebieden blijkt dat bijna alle regenbuien gemiddeld meerdere malen per jaar voorkomen. Een uitzondering vormen twee regenbuien met een herhalingstijd van gemiddeld bijna een maal per twee jaar, waargenomen op 8 juli 1992 in Etzenrade en 30 mei 1993 in Catsop. Met uitzondering van de regenbui op 30 mei te Catsop zijn de onweersbuien die in het voorjaar van 1993 veel overlast hebben veroorzaakt in Zuid-Limburg, aan de hoofdstroomgebieden voorbij gegaan. In de substroomgebieden van Etzenrade is wel de zware bui geregistreerd die op 12 mei 1993 in vooral Oirsbeek veel overlast heeft veroorzaakt.

Afvoer
Uit de meetgegevens is geconcludeerd dat een bui met een bepaalde herhalingstijd nog niets zegt over de herhalingstijd van de afvoer. Er zijn vele andere factoren dan neerslag alleen die bepalen hoeveel afvoer er gegenereerd wordt. Gedurende de twee meetjaren zijn de afvoerhoeveelheden in de winterperiode het grootst geweest. In de hoofdstroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat zijn afvoerpercentages berekend, na mindering van het verhard oppervlak, van resp. 6-8% en 16-20%; in de zomer is dit percentage meestal minder dan 3 in beide gebieden. De grotere afvoerpercentages van de winterbuien in St. Gillisstraat worden waarschijnlijk veroorzaakt door verzadigings- overlandflow. Een groot initieel vochtgehalte van de bodem en een geringe gewas-bedekking hebben in de winter veelal een grote afvoer tot gevolg. Ook in een aantal substroomgebieden is de meeste afvoer opgetreden in de winterperiode. Echter, op substroomgebiedsniveau lijkt het al dan niet optreden van oppervlakkige afstroming sterk samen te hangen met de geteelde gewassen en het landgebruik. Een duidelijke illustratie is het grote verschil in afvoergedrag tussen de winter 1992/93 en de winter 1993/94 in substroomgebied 2 van Catsop. Gedurende de winter 1992/93 had het betreffende perceel een hoge bedekking met italiaans raaigras; tijdens de winter van 1993/94 was de bodem onbedekt na bewerking met een cultivator. Beide winters hadden langdurige natte periodes. Tijdens de eerstegenoemde winter is geen afvoer opgetreden terwijl de tweede winter gekenmerkt werd door vele afvoergebeurtenissen, ook bij geringe neerslaghoeveelheden. Een ander voorbeeld is het herhaaldelijk optreden van erosie in substroomgebied 2 te Etzenrade in het vroege groeiseizoen van 1992 bij suikerbietenteelt en het uitblijven van erosie in het groeiseizoen van 1993 bij verbouw van wintertarwe. Dit terwijl de zwaarst geregistreerde bui gevallen is op 12 mei 1993.

De twee kleinste substroomgebieden (Catsop 1 en Etzenrade 1), die tevens een minder uitgesproken relief hebben en minder steile hellingen, hebben gedurende de gehele meetperiode geen afvoer te zien gegeven. In substroomgebied 1 van Catsop kan dit samenhangen met de gewaskeuze (wintertarwe). Echter, ook het relief en de afmetingen van het substroomgebied spelen een rol, getuige het uitblijven van erosie

in het kleine en vrij vlakke substroomgebied 1 in Etzenrade, waar onder andere suikerbieten zijn geteeld.

Sediment
In het algemeen is de monstername van het oppervlakkige afstromend water succesvol verlopen. Tijdens verscheidene kleine en grotere afvoergebeurtenissen zijn sedimentmonsters genomen in de hoofd- en substroomgebieden.

Over het algemeen zijn de sedimentgehaltes groot in het voorjaar. Afname treedt op naarmate het groeiseizoen vordert. Meteen na de inzaai in het voorjaar en in de winter bij grote afvoergebeurtenissen zijn de grootste sedimentgehaltes waargenomen. Het gevaar voor erosie later in het groeiseizoen tot aan de oogst lijkt beperkt, op basis van de verzamelde gegevens. Dit geldt in mindere mate voor aardappelpercelen getuige de metingen in substroomgebied 2 van Catsop. De sedimentconcentraties die gemeten zijn in de substroomgebieden geven grotere range aan waarden te zien dan die van de hoofdstroomgebieden.

Sedimentafvoer uit substroomgebied 1 St. Gillisstraat, waarin zich de boomgaard bevindt is verwaarloosbaar door de aanwezige grasmat.

Validatiemogelijkheden
De metingen in de verschillende gebieden hebben voldoende neerslag-, afvoer en sedimentgegevens opgeleverd voor zowel de zomer als de wintersituatie, om het LISEM-model te kunnen valideren. De meest geschikte neerslag- en afvoergebeurtenissen voor de validatie van het LISEM-model zijn geregistreerd in de winter. Zowel grote afvoergebeurtenissen als regenbuien die geen afvoer gegenereerd hebben zijn gebruikt voor de validatie van het LISEM-model. Op basis van de gebruikte meetreeks zijn alle scenarioberekeningen van buien met een herhalingstijd groter dan die gemeten zijn (5 jaar) een extrapolatie. Aangezien het LISEM-model echter fysisch-deterministisch is, zijn de hieraan verbonden risico's aanzienlijk kleiner dan bij het gebruik van eenvoudige empirische modellen.

5 Maatregelen ter beperking van bodemerosie en wateroverlast

5.1 Inleiding

Erosie en wateroverlast kan worden tegengegaan door maatregelen die zich richten op een verbetering van het agrarisch beheer van de gronden en/of door maatregelen die zich richten op verbetering van de ruimtelijke inrichting van een gebied. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de resultaten van onderzoek dat verband houdt met beide typen van maatregelen, te weten:

— een onderzoek naar de effecten van teelttechnische maatregelen op proefveldniveau (agrarisch beheer, hoofdstuk 5.2)
— een onderzoek waarbij de effecten van een aantal teeltsystemen, die op proefveldniveau zijn getest, worden geverifieerd op perceelsniveau (agrarisch beheer, hoofdstuk 5.3)
— een onderzoek naar de mogelijkheden van water- en sedimentinvang door groenstroken (ruimtelijke inrichting, hoofdstuk 5.4).

5.2 Erosiebeperkende teeltsystemen op proefveldniveau

5.2.1 Inleiding

Sinds 1986 wordt op de Proefboerderij Wijnandsrade, in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam, onderzoek gedaan naar mogelijkheden om door middel van alternatieve teeltmethoden erosieproblemen te beperken. Dit onderzoek vindt plaats op proefveldjes van 33 m^2. Het heeft tot doel alternatieve teeltsystemen te ontwikkelen, in de eerste plaats voor maïs en suikerbieten, die waterafvoer en erosie van de akker reduceren. De effecten van alternatieve teeltsystemen op de afvoer van water en op bodemverlies worden hier besproken. De gewasopbrengst en de technische uitvoerbaarheid zijn onderzocht door de Proefboerderij Wijnandsrade (zie Jaarverslagen 1992 en 1993). Tabellen 5.1 en 5.2 geven een overzicht van de verschillende teeltsystemen voor snijmaïs en suikerbieten.

Er wordt in dit hoofdstuk uitvoerig op de maïsteeltsystemen ingegaan. Wat betreft de suikerbietenteeltsystemen wordt alleen de reductie van waterafvoer en bodemverlies besproken. Voor een compleet overzicht van de meetmethoden en alle meetgegevens met betrekking tot erosiebeperkende teeltsystemen wordt verwezen naar Van der Zijp (1993 en 1994).

Tabel 5.1 Beschrijving van de teeltsystemen op de maïsproefvelden

Seizoen	Teeltsysteem Bewerking	A	B	C	D	E	F	G
	stoppelbewerking	X	X	X	X	X	X	
	ploegen	X	X	X	X	X		
	inzaai rogge	X	X	X		X		
voorjaar	ploegen						X	X
	rotorkopeg			X			X	X
	zaairijenfrees					X		
	parapflug		X					
	inzaai maïs	X	X	X	X	X	X	X
	stro op zaaibed						X	
naamgeving winter		rogge	rogge	rogge	ploeg	rogge	stoppel	cultiv
naamgeving zomer		direct	parapf	mulch	direct	frees	stro	prakt

Tabel 5.2 Beschrijving van de teeltsystemen op de bietenproefvelden

Seizoen	Teeltsysteem Bewerking	A	B	C	D	E	F
herfst	stoppelbewerking	X	X				
	spitten			X	X	X	X
	inzaai gele mosterd	X	X	X	X	X	X
voorjaar	ploegen	X					
	spitten		X				
	rotorkopeg	X	X			X	
	rotorkopeg met tanden					X	
	zaairijenfrees				X		
	inzaai suikerbieten	X	X	X	X	X	X
naamgeving zomer		ploegen (praktijk)	spitten	direct	frees	mulch	mulch (diep)

De meeste aandacht in dit hoofdstuk gaat uit naar de volgende systemen:
— directzaai in een bodembedekker;
— zaairijenfrees (is gelijk aan directzaai, alleen is er in de zaairij een smalle sleuf gefreesd ten behoeve van de inzaai);
— mulchzaai (de bodembedekker is geëgd vóór de inzaai van het hoofdgewas);
— het strosysteem (inzaai volgens gangbaar systeem, daarna opbrengen van stro op het zaaibed; alleen onderzocht bij maïsteelt);
— gangbaar teeltsysteem (ploegen, zaaibedbereiding, inzaai). In de tekst wordt dit het *praktijk*systeem genoemd.

Er is bij het maïsteeltsystemenonderzoek ook een permanent braaksysteem aangelegd (systeem H). Hierop worden dezelfde bewerkingen uitgevoerd als op het praktijksysteem, alleen zonder inzaai van maïs. Op de braakvelden is ook het effect van een wielspoor op waterafvoer en bodemverlies onderzocht. In deze tekst wordt het braaksysteem niet besproken, omdat het zich moeilijk met andere teeltsystemen laat vergelijken en geen praktische toepassingswaarde heeft.

5.2.2 Meetmethoden

De erosiemetingen zijn op twee manieren verricht:
— bij natuurlijke neerslag (alleen maïsteeltsystemen);
— bij gesimuleerde neerslag (maïs- en suikerbietenteeltsystemen).
Er is gebruik gemaakt van begrensde proefvelden die 1.5 m breed en 22 m lang zijn (zgn. Wischmeyervelden). Van ieder teeltsysteem zijn drie Wischmeyervelden aangelegd. Onderaan ieder veld wordt afstromend water en sediment opgevangen. In het geval van de natuurlijke afvoermetingen worden deze hoeveelheden eens per maand bepaald, evenals allerlei kenmerken van het bodemoppervlak van ieder teeltsysteem en de gewas-ontwikkeling. Ook wordt de hoeveelheid neerslag en spaterosie gemeten.

Dezelfde metingen worden verricht bij de regensimulaties. Echter, de regensimulator beregent slechts een deel van het proefveld, namelijk de onderste 10 m (d.w.z. het beregend oppervlak is 15 m^2). De intensiteit van de neerslag tijdens de regensimulaties is ongeveer 70 mm/h. Ieder veld wordt tweemaal gedurende 45 minuten beregend met een tussenpause van 1 uur (run 1 en run 2). Bij de tweede run heeft de bodem dus een zeer hoog initieel vochtgehalte.

Bij een vergelijking tussen de gegevens van de natuurlijke neerslaggebeurtenissen en de regensimulaties moet rekening worden gehouden met de verschillen in het beregend oppervlak en met het grote verschil in buikarakteristieken.

In het kader van het Erosienormeringsonderzoek zijn een aantal malen de volgende extra metingen verricht:
— bodemruwheid (bepaald op ongeveer dezelfde wijze als die beschreven in 3.5, alleen is niet in een transect gewerkt maar in een grid);
— torvaneweerstand (zie methodebeschrijving in hoofdstuk 3.6);
— aggregaatstabiliteit (zie 3.7);
— porositeit.

Hieronder volgt een bespreking van de erosiebeperkende werking van de verschillende teeltsystemen, die op proefveldniveau zijn getest bij natuurlijke neerslag en gesimuleerde neerslag. Belangrijk hierbij is dat de gepresenteerde reductiegetallen gelden voor het schaalniveau waarop gemeten is. Dat wil zeggen: een 22 m lange helling voor wat betreft de natuurlijke erosiegebeurtenissen en een 10 m lange helling voor wat betreft de regensimulaties. Indien door een langere helling rilvorming optreedt, en daarmee het rilerosieproces belangrijker wordt, kunnen grote afwijkingen optreden in de effectiviteit in erosiebeperking die op de proefvelden is gemeten en de werkelijke effectiviteit. De gepresenteerde gegevens zijn verzameld in de periode oktober 1991 tot september 1993.

5.2.3 Erosiebeperking in de winter bij maïsteeltsystemen

In de winter is alleen gemeten bij natuurlijke neerslag op de proefvelden van het maïsteeltsystemenonderzoek. De metingen geven aan wat het effect is van de najaargrondbewerking (ploegen, optrekken van de stoppel) en van het inzaaien van een wintergewas als bodembedekker op erosie.

Figuur 5.1 geeft de hoeveelheid waterafvoer, bodemverlies en spaterosie aan die optreedt bij de verschillende teeltsystemen t.o.v. het praktijksysteem. Het niet-opgetrokken stoppelveld geeft bijna 15 maal zoveel waterafvoer en 8 maal zoveel bodemverlies als het praktijkveld, waarop een stoppelbewerking is uitgevoerd. Doordat het oppervlak van het stoppelveld sterk verslempt is en een compacte korst heeft, is de hoeveelheid spaterosie hier lager dan bij de andere systemen.

Ten opzichte van een stoppelbewerking heeft inzaai van rogge een geringe erosiebeperking tot gevolg. Ploegen in het najaar heeft in vergelijking met het gebruiken van de vastetandcultivator een beperking van de waterafvoer tot gevolg, maar een toename van het bodemverlies. In aanhangsel 1 staan de meetgegevens voor beide winterperiodes (91/92 en 92/93) in tabelvorm apart weergegeven. Een wielspoor veroorzaakt zeer veel winterafvoer en bodemverlies (aanhangsel 1, systeem Hb).

5.2.4 Erosiebeperking in de zomer bij maïsteeltsystemen

Metingen bij *natuurlijke* neerslag in de zomerperiode laten zien dat slechts twee teeltsystemen waterafvoer reduceren in vergelijking met het praktijksysteem (Figuur 5.2a). De reductie is het grootst bij het strosysteem en bedraagt ongeveer 75%. Bij *gesimuleerde* neerslag met hoge intensiteiten zijn de verschillen in afvoer tussen de systemen kleiner (Figuur 5.2b). Met betrekking tot het effect op de waterafvoer kan gesteld worden dat alleen het strosysteem de waterafvoer *effectief* beperkt.

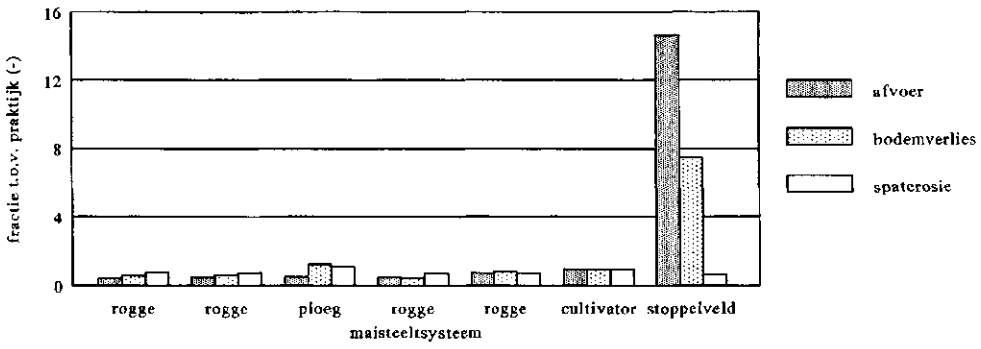


Fig. 5.1 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende teeltsystemen (tabel 5.1) door natuurlijke neerslag gedurende de winterperiode, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem (cultivator = 1). De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer

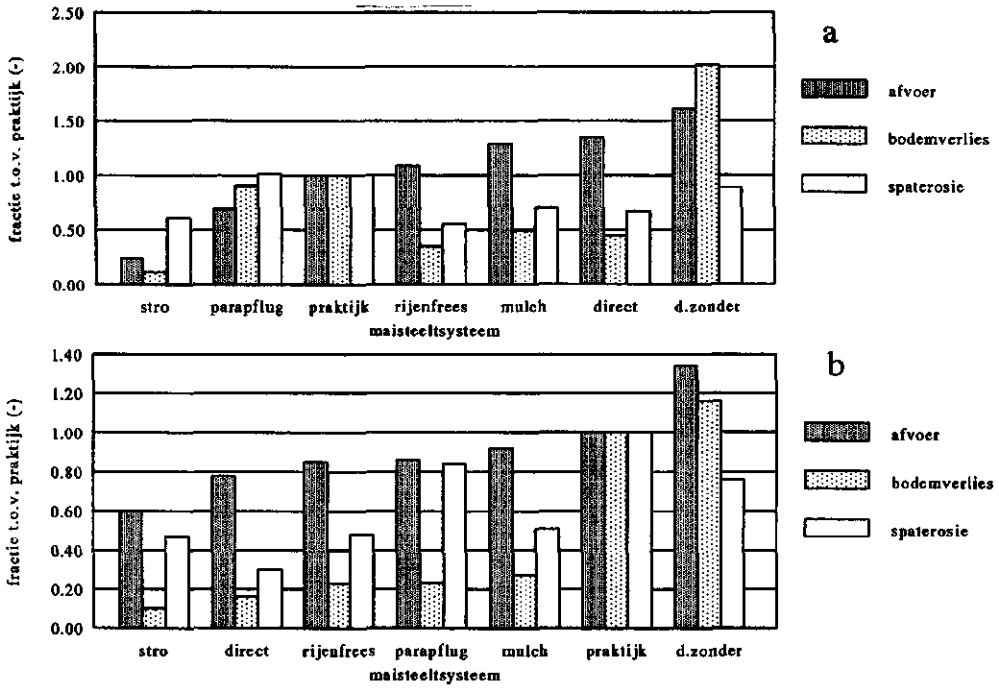


Fig. 5.2 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende maïsteeltsystemen (tabel 5.1) gedurende het groeiseizoen, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem. De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer. a. resultaten bij natuurlijke neerslag; b. bij gesimuleerde neerslag

Reductie van bodemverlies wordt door alle alternatieve systemen bereikt behalve door het directzaaisysteem zonder bodembedekker (D). Directzaai in rogge reduceert het bodemverlies wel sterk ondanks het feit dat de waterafvoer niet of nauwelijks beperkt wordt. De reducties van het bodemverlies bedragen 55% bij natuurlijke en 85% bij gesimuleerde neerslag. Het freessysteem heeft nagenoeg eenzelfde beperking van het bodemverlies tot gevolg. Deze reducties hangen vooral samen met de reductie in de hoeveelheid materiaal die door spaterosie wordt losgemaakt, welke 50 à 70% bedraagt en wordt veroorzaakt door de bedekking van het bodemoppervlak met de roggegewasresten. Ook het geringere microrelief en de hogere aggregaatstabiliteiten die op deze velden gemeten zijn beperken de mogelijkheden voor spaterosie (zie hoofdstuk 5.2.6).

Bij mulchzaai treedt zoals te verwachten iets meer spaterosie op dan bij directzaai. Toch is het bodemverlies slechts weinig hoger. Dit wordt veroorzaakt door de grotere oppervlakteruwheid bij mulchzaai waardoor meer sedimentatie in gesloten oppervlakte-depressies optreedt.

De aanwezigheid van de resten van de bodembedekker is essentieel voor de erosiebeperkende werking bij directzaai. Dit blijkt uit een vergelijking van de gegevens van de beide directzaaisystemen, de een met en de ander zonder roggeresten. Directzaai zonder bodembedekker geeft meer afvoer en bodemverlies dan het praktijksysteem. Anders gezegd: het nalaten van grondbewerking in het voorjaar verhoogd waterafvoer en bodemverlies sterk indien er geen gewasrestenbedekking aan het bodemoppervlak is.

Het strosysteem reduceert spaterosie iets minder sterk als directzaai in rogge. Echter door de sterke waterafvoerreductie wordt het totale bodemverlies zeer sterk beperkt (met meer dan 90% ten opzichte van het praktijksysteem).

De hierboven gemeldde effecten van de teeltsystemen kan men als volgt uitleggen. Directzaai in een bodembedekker beperkt de mogelijkheid van de neerslag en het stromende water om bodemdeeltjes los te maken. De afvoer bevat hierdoor minder sediment. Mulchzaai beperkt spaterosie minder effectief, maar biedt het stromende water alsnog de mogelijkheid zijn sedimentlast te verminderen door de grotere ruwheid van het oppervlak. Opbrengen van stro beperkt de stroomsnelheid van het water: er vormen zich op veel plaatsen dammetjes van stro dat over korte afstand verplaatst is en dat blijft hangen tegen ruwheidselementen van het bodemoppervlak. Hierdoor ontstaan diepere waterplassen waarin de stroomsnelheid laag is en, als er al sprake is van een sedimentlast meteen weer sedimentatie optreedt. Uit de gegevens van de regensimulaties is, met behulp van de 'recession curve method' beschreven door Mohamoud (1992), de gemiddelde stroomsnelheid van het water op de plotjes berekend. Hieruit blijkt inderdaad de remmende werking van het stro. De stroomsnelheid bedraagt ongeveer 4 cm/s op het stroveld, terwijl voor de overige systemen de snelheden varieren tussen de 8 en 12 cm/s. In beginsel heeft praktijksysteem eenzelfde bodemruwheid als het strosysteem. Echter zodra water zich stroombanen heeft gecreëerd, zijn de stromingsobstakels ook definitief verdwenen. Bij het strosysteem blijft de weerstand die de stroming ondervindt veel langer intakt doordat steeds weer nieuwe obstakels worden gevormd als gevolg van het continu herrangschikken van het stromateriaal op het bodemoppervlak. Daarnaast blijft het eigenlijke microrelief van de geëgde bodem door de beschermende werking van het stro langer bewaard dan bij het relatief onbeschermde oppervlak van het praktijksysteem. De afname van de infiltratiecapaciteit in de loop van het groeiseizoen als gevolg van verslemping en structuurverlies zal bij het strosysteem ook minder snel verlopen. In aanhangsel 2 staan de meetgegevens per groeiseizoen (1992 en 1993) en, in geval van gesimuleerde neerslag, per run vermeld.

Vergelijking tussen natuurlijke afvoermetingen en regensimulaties
Directzaai en het freessysteem reduceren bij gesimuleerde neerslag de afvoer met ongeveer 20%. Bij natuurlijke neerslag is juist een lichte toename van de afvoer gemeten. Bij de eerste run van de regensimulaties geeft mulchzaai meer afvoer dan het praktijksysteem, bij de tweede run minder (aanhangsel 2). Opvallend is dat het strosysteem beduidend minder effectief waterafvoer beperkt tijdens de regensimulaties dan bij natuurlijke neerslag. Bij natuurlijke neerslag bedraagt de afvoer 20% t.o.v. het praktijksysteem, bij run 1 is dat ongeveer 50% en bij run 2 ongeveer 65%. Dus hoe hoger de neerslagintensiteit en cumulatieve hoeveelheid neerslag, en hoe hoger het intiële vochtgehalte, hoe minder de afvoerbeperkende werking van het strosysteem. Nietemin is ook bij de regensimulaties dit systeem het meest erosiebeperkend.

Een ander verschil tussen natuurlijke neerslag en regensimulaties is dat de beperking van het bodemverlies én spaterosie door de erosiebeperkende teeltsystemen aanzienlijk groter is bij de regensimulaties. Dat wil zeggen dat bij veel neerslag met hoge intensiteit deze systemen t.o.v. het praktijksysteem alleen maar effectiever worden.

Als laatste valt op dat de verschillen in hoeveelheid waterafvoer bij run 2 van de regensimulaties kleiner zijn dan bij run 1 en bij natuurlijke neerslag.

5.2.5 Erosiebeperking in de zomer bij bietenteeltsystemen

Bij regensimulaties op bietenproefvelden zijn bij het directzaai- en het zaairijenfrees-systeem (in gele mosterd) hoge reducties van bodemverlies gemeten van meer dan 90% ten opzichte van het praktijksysteem (Figuur 5.3). Deze systemen geven een tevens een reductie in de waterafvoer te zien van ongeveer 25%. Mulchzaai reduceert niet de waterafvoer, wel het bodemverlies en de spaterosie. Spaterosie wordt het meest effectief beperkt door directzaai in een bodembedekker. Deze resultaten stemmen in grote lijnen overeen met de resultaten van de regensimulaties op de maïsproefvelden. In aanhangsel 3 staan de meetgegevens per run in tabelvorm vermeld.

5.2.6 Kenmerken van het gewas en het bodemoppervlak

Per teeltsysteem zijn verschillende kenmerken van het gewas en bodemoppervlak bepaald. Op de maïsproefvelden is dit voor een aantal parameters maandelijks gebeurd. Voor een uitvoerige beschrijving van deze opnamen wordt verwezen naar Van der Zijp (1993, 1994). Hier wordt voor de winter- en de zomerperiode in het kort vastgesteld of er significante verschillen bestaan in parameterwaarden tussen de verschillende teeltsystemen.

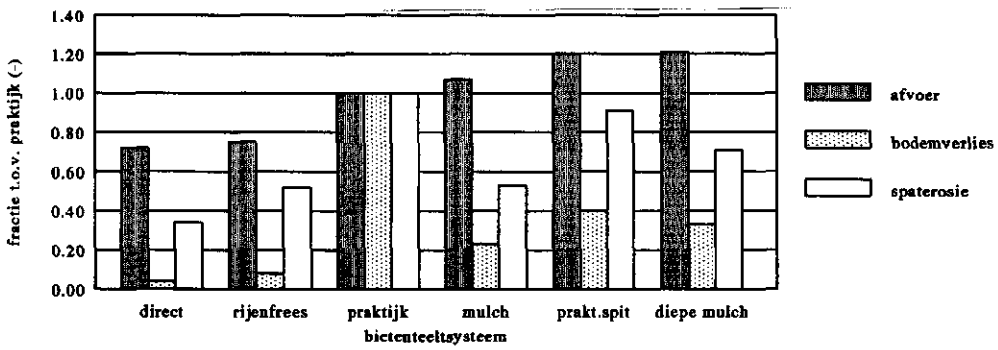


Fig. 5.3 Afvoer, bodemverlies en spaterosie bij verschillende bietenteeltsystemen (tabel 5.2) door gesimuleerde neerslag gedurende het groeiseizoen, uitgedrukt als fractie van de meetwaarden van het praktijksysteem. De systemen zijn gesorteerd op toenemende afvoer

Vegetatiebedekking

In de *winterperiode* (tabel 5.3) hebben systemen A,B,C en E een roggegewas waarvan de bedekking vooral in het vroege voorjaar snel toeneemt. Verder is er bij de niet-opgerokken stoppel (systeem F) en in mindere mate bij de opgetrokken stoppel (G) sprake van gewasrestenbedekking. Onkruid- en mos/algenbedekking spelen in de winterperiode geen grote rol. Er zijn geen significante verschillen in de mosbedekking.

Tabel 5.3 Gemiddelde waarden voor vegetatiebedekking op maïsteeltsystemen in de winterperiode[1]

Systeem	Gewas-bedekking (+/-)	Gewasrest-bedekking (%)	Onkruid-bedekking (%)	Mos/algen-bedekking (%)
A (rogge)	+	1,58	0,17	2,96
B (rogge)	+	0,65	0,25	0,46
C (rogge)	+	1,08	0,21	0,13
D (ploeg)	-	1,60	2,83	2,92
E (rogge)	+	1,42	0,25	1,04
F (stoppelveld)	-	15,94	8,19	3,13
G (cultivator)	-	7,94	3,96	1,15

[1] gegevens van winter 91/92 i.v.m. slechte kwaliteit van de winterrogge in de winter 92/93

De roggesystemen hebben significant minder onkruidbedekking, het niet-opgetrokken stoppelveld heeft significant meer onkruid dan de overige systemen.

Gedurende het *groeiseizoen* (tabel 5.4) hebben alle systemen een gewasbedekking. Hierin zijn geen significante verschillen tussen de systemen. Wat betreft de gewasrestbedekking (rogge) kunnen vier significant van elkaar verschillende groepen worden onderscheiden (in volgorde van toenemende bedekking):
— praktijk, directzaai zonder rogge;
— mulchzaai;
— parapflug, directzaai, zaaifrees;
— stro.

Er bestaan geen significante verschillen in onkruidbedekking. De mos/algenbedekking is gedurende het groeiseizoen aanmerkelijk hoger dan in de winterperiode. De hoeveelheid lijkt af te hangen van de mate van verstoring van het oppervlak bij de maïsinzaai. Er kunnen drie, elkaar overlappende groepen worden onderscheiden, in volgorde van toenemende bedekking:
— stro, praktijk, mulch, zaaifrees;
— praktijk, mulch, zaaifrees parapflug;
— zaaifrees, parapflug, directzaai, directzaai zonder rogge.

Tabel 5.4 Gemiddelde waarden voor vegetatiebedekking op maïsteeltsystemen in de zomerperiode[1]

Systeem	Gewas-bedekking (+/-)	Gewasrest-bedekking (%)	Onkruid-bedekking (%)	Mos/algen-bedekking (%)
A (direct rogge)	+	36,94	1,44	58,61
B (parapflug)	+	30,83	1,33	49,72
C (mulch)	+	22,22	1,22	36,00
D (direct zonder)	+	0,56	1,67	60,56
E (zaaifrees)	+	33,89	2,11	45,83
F (stro)	+	44,17	0,72	15,00
G (praktijk)	+	0,00	0,56	29,00

[1] gegevens van groeiseizoen 1992 i.v.m. slechte kwaliteit van de winterrogge in de winter 92/93

Bodem- en oppervlaktekenmerken

De porositeit van de bovengrond in de *winterperiode* (tabel 5.5) is voor de meeste teeltsystemen ongeveer gelijk. Alleen de niet-opgetrokken stoppel heeft een significant lagere porositeit. De verschillen in porositeit zijn in het begin van de winter groter dan aan het einde (tabel 5.6).

Wat betreft de mate van verslemping zijn twee groepen te onderscheiden (in volgorde van toenemende verslemping):

— de roggesystemen, het geploegde en opgetrokken veld;

— de niet-opgetrokken stoppel.

De bodemruwheid en de gemiddelde diepte van de plassen in gesloten depressies is het grootste voor het geploegde en opgetrokken veld, gevolgd door de met rogge ingezaaide velden. De torvaneweerstand van de roggesystemen is significant lager dan de overige systemen. Het sterk verslempte oppervlak van het onbewerkte stoppelveld heeft een hoge torvaneweerstand. Er is geen seizoensmatige trend in torvaneweerstand gedurende de winterperiode vastgesteld. Dit laatste geldt ook voor de aggregaatstabiliteit. Deze is laag gedurende de winter en de verschillen tussen de systemen zijn niet significant.

Tabel 5.5 Gemiddelde waarden van bodem- en oppervlaktekenmerken van maïsteeltsystemen in de winterperiode

Systeem	Porositeit (-)	Random roughness (cm)	Opp. berging (mm)[1]	Gem. plasdiepte (mm)[1]	Boekelklasse (-)	torvaneweerstand (kPa)	aggreg. stabiliteit (-)
A (rogge)	0,52	1,01	0,18	2,18	4,60	0,85	11,38
B (rogge)	0,52	0,90	0,40	2,74	4,74	0,86	9,09
C (rogge)	0,52	0,69	0,11	1,20	4,69	0,94	11,92
D (ploeg)	0,53	1,80	0,77	10,13	4,62	1,19	8,50
E (rogge)	0,52	1,18	0,25	2,31	4,61	0,78	12,73
F (stoppelveld)	0,50	0,48	0,22	1,68	2,80	1,47	10,17
G (praktijk)	0,52	1,18	0,82	5,03	4,63	1,39	12,25

[1] Bij heersende hellingshoek (9 à 10%).

Tabel 5.6 Verloop van de porositeit voor de teeltsystemen gedurende de winterperiode

Systeem	Porositeit (-) begin winter	midden winter	einde winter
A,B,C,E (rogge)	0,58	0,52	0,51
D (ploeg)	0,55	0,53	0,53
F (niet opgetrokken)	0,53	0,51	0,48
G (opgetrokken)	0,57	0,51	0,51

Gedurende het *groeiseizoen* (tabel 5.7) is de porositeit van het stro- en praktijksysteem significant hoger dan die van de overige systemen. Er is geen duidelijke af- of toename in de tijd waargenomen. De bodemruwheid en oppervlakteberging is klein bij de directzaaisystemen en het freessysteem. Dit hangt samen met de hogere verslempingsgraad. Dit zijn tevens de systemen met een hoge torvaneweerstand. Mulchzaai en het parapflugsysteem geven een sterk onregelmatig oppervlak, wat zich uit in hoge waarden voor de random roughness en de gemiddelde plasdiepte.

De aggregaatstabiliteit is in het groeiseizoen significant hoger dan gedurende de winter. Bij directzaai in rogge en bij mulchzaai zijn relatief hoge aggregaatstabiliteiten gemeten, bij directzaai zonder rogge en het parapflugsysteem zijn lage waarden gevonden. Het is onduidelijk waar de verschillen aan zijn toe te schrijven. De range van de hier gemeten aggregaatstabiliteitswaarden komt overeen met die van tabel 3.15.

Tabel 5.7 Gemiddelde waarden van bodem- en oppervlaktekenmerken van maïsteeltsystemen in de zomerperiode

Systeem	Porositeit (-)	Random roughness (cm)	Opp. berging (mm)[1]	Gem. plasdiepte (mm)[1]	boekelklasse (-)	torvaneweerstand (kPa)	aggreg. stabiliteit (-)
A (direct)	0,53	0,52	0,09	1,07	3,38	0,94	27,50
B (parapflug)	0,54	0,98	0,57	4,75	3,68	0,75	12,42
C (mulch)	0,54	1,10	1,23	5,74	3,65	0,55	20,75
D (d,zonder)	0,51	0,58	0,01	0,45	3,19	0,88	11,33
E (zaaifrees)	0,53	0,67	0,29	1,79	3,26	0,92	15,75
F (stro)	0,57	0,76	0,64	3,08	4,00	0,70	12,33
G (praktijk)	0,56	0,71	0,26	1,93	4,03	0,57	17,92

[1] Bij heersende hellingshoek (9 à 10%)

Samenhang tussen gewas- en bodemoppervlaktekenmerken en erosie

Door meetgegevens van regensimulaties te analyseren is getracht vast te stellen wat bovenstaande parameters zeggen over de mate van erosie die men kan verwachten.

Hierbij is eerst vastgesteld welke parameters significant correleren met de volgende grootheden:
— spaterosie;
— waterafvoer;
— sedimentconcentratie van de waterafvoer.
De hoeveelheid bodemverlies wordt dan bepaald door de waterafvoer en de sedimentconcentratie. In tabel 5.8 staan de correlatiecoëfficiënten en het bijbehorende significantieniveau gegeven. De correlaties zijn alleen gegeven indien een relatie tussen de parameter en één van drie grootheden voorstelbaar is en indien de parameters onderling niet te sterk samenhangen (bijvoorbeeld boekelklasse en random roughness).

De tabel geeft aan dat de waterafvoer afneemt met toenemende gewasrestenbedekking en afnemende verslemping. Beide parameters bepalen de weerstand die afstromend water ondervindt. Daarbij neemt infiltratie af met toenemende verslemping. Ook het initieel vochtgehalte is van belang voor de hoeveelheid afstromend water.

Spaterosie wordt, behalve door de kinetische energie van de neerslag, in hoge mate bepaald door de bedekkingsgraad. Verder neemt spaterosie toe met afnemende schuifweerstand van de bodem en aggregaatstabiliteit.

De sedimentconcentratie van het afstromende water hangt af van de hoeveelheid materiaal dat losgemaakt wordt door spaterosie en door de hoeveelheid afstromend water. Indirect is dus de bedekkingsgraad ook hierop van invloed.

Bovenstaande tabel geeft inzicht in de wijze waarop een teeltsysteem van invloed is op de erosie. Voor de zomersituatie geldt dat het strosysteem als enige effectief de afvoer beperkt. Dit hangt met de hoge gewasrestenbedekking en de relatief lage verslempingsgraad samen. Directzaai in rogge beperkt het meest effectief de spaterosie door de hoge schuifweerstand, de hoge bedekkingsgraad en de hoge aggregaatstabiliteit. De spaterosiebeperking door het strosysteem gebeurt meer op basis van de hogere bedekkingsgraad van het oppervlak.

Tabel 5.8 Correlatiecoëfficiënten tussen gewas- en bodemparameters en waterafvoer, spaterosie en de sedimentconcentratie gebaseerd op metingen tijdens 18 regensimulaties. De significanties van de correlaties staan tussen haakjes

Parameter	Waterafvoer	Spaterosie	Sedimentconc.
bedekkingsgraad	-0,78 (0,00)	-0,82 (0,00)	
kin. energie neerslag	0,46 (0,05)	0,47 (0,05)	
torvane		-0,46 (0,05)	
aggregaatstabiliteit		-0,46 (0,05)	
initieel vochtgehalte	0,50 (0,04)		
boekelklasse	-0,57 (0,01)		
waterafvoer			0,67 (0,00)
spaterosie			0,81 (0,00)
Verklaarde variantie	0,93	0,70	0,77

Toelichting:
— Als bedekkinggraad is de som van gewasbedekking en gewasrestbedekking genomen. Aangezien de gewasbedekking constant is wordt de invloed van de bedekkingsgraad bepaald door de gewasrestenbedekking;
— De gegeven verklaarde variantie geldt voor een geoptimaliseerd regressiemodel waarin de betreffende parameters zijn opgenomen.

5.2.7 Conclusies

Op basis van het onderzoek op proefveldniveau kunnen de volgende conclusies worden getrokken. Deze conclusies gelden voor het schaalniveau waarop het onderzoek is uitgevoerd.

Winter
Waterafvoer en bodemverlies worden aanzienlijk beperkt door een najaarsbewerking zoals een stoppelbewerking met de vastetandcultivator. Inzaai van een bodembedekker veroorzaakt een geringe extra reductie van de erosie. De aanwezigheid van een wielspoor heeft veel waterafvoer en bodemverlies tot gevolg.

Zomer
Waterafvoer wordt het beste gereduceerd door het uitvoeren van de gangbare voorjaarsbewerkingen en het opbrengen van stro na de inzaai van het hoofdgewas. Tijdens regensimulaties werd de waterafvoer tot maximaal 40% gereduceerd door systemen waarbij in een bodembedekker wordt ingezaaid, al dan niet met behulp van

een zaairijenfrees. Bij natuurlijke neerslag veroorzaakten deze systemen juist een toename van de waterafvoer.

Bodemverlies wordt vooral bepaald door de hoeveelheid gewasresten die zich op het bodemoppervlak bevinden. Het opbrengen van stro geeft een hoge bedekkingsgraad en, mede door de reductie van de waterafvoer, het minste bodemverlies. Ook directzaai in een bodembedekker (eventueel m.b.v. een zaairijenfrees) reduceert het bodemverlies in sterke mate. De reducties zijn groter bij neerslag van hoge intensiteit (regensimulaties) en bedragen soms meer dan 90%.

5.3 Erosiemetingen op demonstratiepercelen

5.3.1 Inleiding

De teeltsystemen directzaai en mulchzaai zijn op bedrijfsniveau in de praktijk gebracht in het kader van het Erosieverificatie-onderzoek en later het Demonstratie-project Bestrijding/Beperking Bodemerosie op Bedrijfsniveau. Hierbij staat de praktische en economische haalbaarheid van dergelijke teeltsystemen centraal. Tot en met 1991 werd de mate van erosie op deze zgn. demonstratiepercelen niet anders dan kwalitatief vastgesteld. Toch is kwantitatieve informatie gewenst om de gegevens van de demonstratiepercelen te completeren. Daarbij kan men er niet vanuit gaan dat de resultaten van het proefveldonderzoek van de Proefboerderij zonder meer van toepassing zijn op de demonstratiepercelen door verschillen in hellingkarakteristieken (lengte, hoek en vorm) en bodem. Om deze reden zijn in het kader van het Erosienormeringsonderzoek erosiemetingen verricht op enkele demonstratiepercelen. Het *doel* van de metingen is: verificatie op perceelsniveau van de effecten van bepaalde teeltmaatregelen, zoals die zijn vastgesteld op proefveldniveau.

5.3.2 Meetmethoden

Voor de erosiemetingen is gebruik gemaakt van opvangbakken die aan de voet van de helling worden ingegraven en die afstromend water met sediment invangen. Het meetprincipe is gebaseerd op een beschrijving van Seiler (1980). De bakken hebben een instroombreedte van 1 m en een capaciteit van 220 l. Wanneer deze capaciteit wordt overschreden stroomt het overtollige water via een filter aan de achterzijde weg; het sediment blijft achter. Dat wil zeggen dat van relatief kleine erosie-gebeurtenissen het bodemverlies en de waterafvoer bepaald kan worden, van grotere gebeurtenissen alleen het bodemverlies. Tijdens het groeiseizoen stonden de bakken steeds in een zaaispoor. De gedachte hierachter is dat afstromend water in het gebied tussen de sporen na enige tijd toch in het spoor terecht komt en via het spoor verder hellingafwaarts stroomt. In de winterperiode zijn wielsporen afwezig in percelen met winterrogge, -tarwe of gele mosterd. De weg die het water dan volgt en het deel van de helling dat afstroomt op het punt waar de bak geplaatst is, zijn dan moeilijk vast

te stellen. In welke mate de wintergegevens representatief zijn voor het totale perceel is daarom onduidelijk.

De meetlocaties hebben allen een praktijkgedeelte met gangbaar teeltsysteem (*praktijk*perceel) en een gedeelte met een erosiebeperkend teeltsysteem (*demo*perceel). Op iedere locatie is steeds één opvangbak in het praktijkperceel geplaatst en één in het demoperceel. Bij de selectie van de locaties is erop gelet dat hellinglengte en -vorm en hellingshoek van het praktijk- en demogedeelte zo min mogelijk van elkaar verschillen. Dit om het effect van het teeltsysteem zo goed mogelijk te kunnen vast stellen.

5.3.3 Groeiseizoen 1992

Meetlocaties

Uit de lijst van deelnemers aan het Demonstratieproject van de Dienst Landbouwvoorlichting zijn drie locaties met suikerbieten en drie met snijmaïs geselecteerd. Het betreft de percelen met de codes 4, 5, 7 (suikerbieten) en 11, 13 en 15 (snijmaïs), zoals beschreven in het Jaarverslag van de Proefboerderij Wijnandsrade van 1992, hoofdstuk 3. Tabel 5.9 geeft een overzicht van de toegepaste teeltmethoden op de demonstratiepercelen van de verschillende locaties in 1992. Ook staan hier de hellinggegevens vermeld. Op de praktijkgedeelten zijn gangbare methoden gebruikt. Wel moet worden opgemerkt dat op praktijkperceel 5 de zaaisporen gewist zijn.

Tabel 5.9 Gegevens van de erosiebeperkende teeltsystemen op de demonstratiepercelen, en hellinggegevens. (Perceelcodering is gelijk aan die van Jaarverslag 1992 van Proefboerderij Wijnandsrade, Hoofdstuk 3)

Perceels-code	Bodembedekker[1]	Hoofdgewas	Inzaai-methoden[2]	Helling-lengte (m)	Hellings hoek (%)
4	wintertarwe	suikerbieten	D,P	85	8 - 10
5	ital. raaigras	suikerbieten	M,P[3]	110	12 - 14
7	gele mosterd	suikerbieten	D,P	60	9
11	winterrogge	snijmaïs	D[3],P	65	13
13	winterrogge	snijmaïs	D,P	92	10 - 12
15	winterrogge	snijmaïs	[4],P	55	12
				60	1 - 3

[1] de bodembekkers gelden alleen voor de gedeelten met direct- en mulchzaai
[2] D, M, P zijn resp. direct-, mulch- en praktijkzaai
[3] sporenwisser gebruikt bij inzaai
[4] doodgespoten rogge ingefreesd, inzaai maïs met gewone zaaimachine

Resultaten

Hieronder volgt een bespreking van de meetresultaten per locatie. Per locatie is steeds het volgende vermeld in tabelvorm:

— de hoeveelheid neerslag die gevallen is sinds de laatste bemonstering;
— de hoeveelheid water die op de betreffende datum in de opvangbakken is aangetroffen (in liter per meter instroombreedte);
— de sedimentconcentratie van dat water in gram per liter;
— het bodemverlies dat uit de twee voorgaande gegevens berekend kan worden.

In onderstaande tabellen zijn bemonsteringen, waarbij geen of een verwaarloosbare hoeveelheid water werd aangetroffen in beide bakken, weggelaten, behalve in enkele gevallen waar het wel vermelden van deze gegevens belangrijk is voor de interpretatie. Als laatste wordt in de tabellen de totale neerslag en afvoer en het totale bodemverlies over de hele meetperiode vermeld (inclusief de onbelangrijke gebeurtenissen).

Indien er meer dan 220 liter water de bak in is gestroomd is dat aangegeven in de tabellen met '>220'. De sedimentconcentratie is in die gevallen niet gegeven omdat deze geen verband meer houdt met de werkelijke sedimentconcentratie van het afgestroomde water.

Locatie 4, suikerbieten (directzaai)

Tabel 5.10 geeft een overzicht van de verzamelde erosiegegevens van locatie 4. Bij vier van de acht bemonsteringen was er sprake van een significante hoeveelheid materiaal in de bakken: 7 en 24 juni en 7 en 21 juli. Er zijn grote verschillen te zien in waterafvoer en bodemverlies tussen het demo- en praktijkperceel. Van het praktijkperceel komt 2 tot 7 maal meer water af (over het totaal 2.3 maal). Daarbij is de sedimentconcentratie van dat water veel hoger (2 tot 25 maal). Het bodemverlies van het praktijkperceel over de totale periode is 5,6 maal het bodemverlies van het demoperceel. Het erosiebeperkend teeltsysteem zorgt op deze locatie dus voor een betere infiltratie en verhoogde weerstand van de bodem tegen het losmaken van bodemdeeltjes. Dit ondanks het feit dat de resten van de afgestorven bodembedekker (wintertarwe) nauwelijks terug te vinden waren aan het bodemoppervlak.

Tabel 5.10 Resultaten perceel 4, groeiseizoen '92.

Datum (d/m)	Neer-slag (mm)	Directzaai			Praktijk		
		Water afvoer (l/m)	Sed. conc (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
07-06	18,3	8,0	4,8	0,0	39,6	15,2	0,6
24-06	46,5	22,8	2,8	0,1	165,0	70,1	11,6
07-07	52,9	89,9	52,1	4,7	150,7	110,8	16,7
21-07	18,7	31,2	18,0	0,6	53,1	40,4	2,1
Totaal	299,5	175,2		5,4	406,7		30,5

Het neerslagtotaal geldt voor het gehele groeiseizoen en omvat dus ook buien die (vrijwel) geen afvoer hebben veroorzaakt. Dit betreft de kleinere buien en de buien later in het groeiseizoen bij een hoge gewasbedekking.

Locatie 5, suikerbieten (mulchzaai)

Op deze locatie zijn de erosiemetingen in het demoperceel verricht op een gedeelte waar mulchzaai was toegepast. Uit de meetresultaten (tabel 5.11) blijkt dat:

— er gedurende het hele groeiseizoen geen waterafvoer (en dus ook geen bodemverlies) is geweest van het praktijkperceel, waarschijnlijk door het gebruik van sporenwissers waarmee de zaaisporen zijn verwijderd;

— er wel erosie is geweest op de strook waar mulchzaai is toegepast, maar alleen in het begin van het groeiseizoen (hier zijn geen sporenwissers gebruikt);
— de gemeten sedimentconcentraties van dit afgestroomde water steeds erg laag zijn; het totale bodemverlies van het demoperceel is daarom toch gering.

Tabel 5.11 Resultaten perceel 5, groeiseizoen '92

Datum (d/m)	Neer-slag (mm)	Mulchzaai			Praktijk		
		Water afvoer (l/m)	Sed. conc (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
07-06	33,7	20,6	4,0	0,1	4,2	0,0	0,0
17-06	26,7	183,2	8,2	1,5	9,8	13,7	0,1
23-06	45,5	>220	2,5	0,6	6,0	6,7	0,0
07-07	41,1	9,5	2,0	0,0	8,4	8,8	0,1
15-08	63,7	14,1	1,3	0,0	18,3	2,6	0,0
01-09	71,6	13,5	2,2	0,0	18,9	2,2	0,0
Totaal	285,8	>450		2,1	73,0		0,3

Locatie 7, suikerbieten (directzaai)

Op deze locatie is geen erosie geweest gedurende groeiseizoen '92. De oorzaak hiervan is onbekend, maar kan samenhangen met het karakter van de neerslaggebeurtenissen, de wijze van grondbewerking of het bodemtype. Een eventueel verschil ten aanzien van erosie tussen praktijk- en demoperceel kan niet worden vastgesteld.

Locatie 11, snijmaïs (directzaai)

Evenals op locatie 4, komt ook hier het demoperceel, waar directzaai is toegepast, heel duidelijk als erosiebeperkend naar voren. Het bodemverlies is verwaarloosbaar (minder dan 1% van het bodemverlies van het praktijkperceel). De waterafvoer wordt drastisch verminderd en bedraagt ongeveer 15% van de afvoer gemeten op het praktijkperceel.

Tabel 5.12 Resultaten perceel 11, groeiseizoen '92

Datum (d/m)	Neer-slag (mm)	Directzaai			Praktijk		
		Water afvoer (l/m)	Sed. conc (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
23-06	36,0	15,1	1,3	0,0	145,5	56,7	8,2
07-07	33,0	8,0	0,0	0,0	16,7	79,5	1,3
15-08	70,0	5,4	0,6	0,0	153,0	29,9	4,6
01-09	73,2	9,2	0,3	0,0	42,5	6,4	0,3
Totaal	295,3	59,6		0,1	404,2		14,6

Locatie 13, snijmaïs (directzaai)
Voor deze locatie geldt hetzelfde als voor locatie 11: het erosiebeperkend teeltsysteem met directzaai zorgt voor een sterke reductie van het bodemverlies en waterafvoer (resp. ongeveer 3 en 15% van de waarden gemeten op het perceel met gangbaar teeltsysteem).

Tabel 5.13 Resultaten perceel 13, groeiseizoen '92

Datum (d/m)	Neer-slag (mm)	Directzaai			Praktijk		
		Water afvoer (l/m)	Sed. conc (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
07-06	39,6	37,9	7,2	0,3	53,5	6,2	0,3
23-06	58,4	45,9	6,7	0,3	>220	-	12,3
07-07	44,3	15,1	10,6	0,2	196,3	46,3	9,1
18-08	70,0	21,1	1,6	0,0	80,0	3,6	0,3
01-09	53,2	13,1	1,2	0,0	28,8	4,1	0,1
Totaal	266,1	107,9		0,5	>580		21,9

Locatie 15, snijmaïs (infrezen bodembedekker)
Op deze locatie is sprake geweest van ernstige erosie, geïnitieerd door de zware neerslag op 8 juni 1992. Tijdens deze bui zijn rills ontstaan, waardoor minder hevige buien die daarna zijn gevallen, vaak toch flinke afvoer tot gevolg konden hebben. De meetgegevens laten zien dat ook op het demoperceel zware erosie heeft plaatsgehad. Over het hele groeiseizoen gezien is het bodemverlies van het demoperceel lager is dan van het praktijkgedeelte. Dit verschil is er niet aan het begin van het groeiseizoen (toen gaf het demoperceel zelfs meer bodemverlies) maar wordt steeds duidelijker naarmate het groeiseizoen vordert. Dit teeltsysteem, waarbij de bodembedekker geheel wordt ingefreesd, kan echter zeker niet erosiebeperkend worden genoemd. Daarvoor is het bodemverlies te groot.

Tabel 5.14 Resultaten perceel 15, groeiseizoen '92.

Datum (d/m)	Neer-slag (mm)	Demoperceel			Praktijk		
		Water afvoer (l/m)	Sed. conc (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
10-06	-	>220	-	67,3	>220	-	51,9
29-06	36,8	>220	-	25,4	>220	-	43,5
07-07	29,8	159,9	19,2	3,1	>220	-	23,6
18-08	-	>220	-	1,3	>220	-	7,7
01-09	-	>220	-	13,3	>220	-	26,3
Totaal	-	>>1052		110,3	>>1130		153,0

5.3.4 Winter 1992/1993

Gedurende de winter zijn metingen verricht op vier locaties. Het betreft de locaties met de codes 1, 2, 10 en 11 (Jaarverslag Proefboerderij Wijnandsrade, 1993). Tabel 5.15 bevat de perceelsgegevens en de meetresultaten. Het betreft hier totalen van afvoer en bodemverlies gedurende de winterperiode. De resultaten van de afzonderlijke bemonsteringen (ongeveer één maal per maand) geven geen extra informatie en zijn daarom hier niet opgenomen.

Tabel 5.15 Resultaten van erosiemetingen gedurende de winterperiode bij verschillende bodembedekkers op een viertal locaties

Perceelcode	Hellinglengte (m)	Hellingshoek (%)	Bodembedekker	Waterafvoer (l/m)	Gem.sed. conc. (g/l)	Bodemverlies (kg/m)
1	65	9,1	w.tarwe	102,5	6,2	0,636
			w.tarwe	357,9	10,2	3,646
2[1]	90/130	10,5/15	g.mosterd	7,7	3,3	0,025
			g.mosterd	37,3	3,5	0,129
10[2]	40	11,2	w.rogge	103,4	2,9	0,296
			geen[3]	134,8	3,1	0,417
11	80	12,5	w.rogge	184,3	4,1	0,755
			w.rogge	222,0	5,4	1,188

[1] zuivere kleefaarde
[2] zeer onzuivere löss, neigend naar kleefaarde
[3] geen bodembedekker ingezaaid, najaarsbewerking met vastetandcultivator

Uit de tabel komt duidelijk naar voren dat op percelen met *kleefaarde* gedurende de winter nauwelijks erosie optreedt. Op perceel 2 is, ondanks de grote hellingslengte en hellingshoek, vrijwel geen erosie opgetreden. Het water dat afstroomt van de kleefaardepercelen (code 2 en 10) bevat weinig sediment (2,9 tot 3,5 g/l), waarbij de invloed van de aanwezigheid van een bodembedekker niet groot lijkt. Gebleken is dat de stabiliteit van de bodemaggregaten van kleefaarde beduidend hoger is dan die van löss. Dit hangt vooral samen met het hogere klei- en organisch stofgehalte van kleefaarde. De hogere aggregaatstabiliteit heeft verschillende effecten, waardoor erosie minder kans krijgt. Er treedt minder structuurverval en korstvorming op, waardoor de infiltratiecapaciteit na bodembewerking niet snel afneemt. Er worden minder bodemdeeltjes losgemaakt door druppelinslag (spaterosie) en afstromend water. Tenslotte blijft de oppervlakteruwheid van de bodem langer intact na een bewerking. Hierdoor kan meer water aan het oppervlak geborgen worden en wordt afstromend water geremd. Het afstromend water heeft hierdoor een relatief geringe erosieve kracht.

5.3.5 Groeiseizoen 1993

Meetlocaties

Tabel 5.16 geeft een overzicht van de toegepaste teeltmethoden en de hellinggegevens op de demonstratiepercelen waar gedurende het groeiseizoen van 1993 gemeten is.

Resultaten

In vergelijking met groeiseizoen 1992 zijn er minder erosiegebeurtenissen geweest. Op percelen 2, 10 en 11 is gedurende het groeiseizoen nauwelijks erosie opgetreden. De gegevens van deze percelen zijn daarom samengevoegd in één tabel (tabel 5.19).

Tabel 5.16 Gegevens van de erosiebeperkende teeltsystemen en hellinggegevens op de demonstratiepercelen. (De perceelscodes: Jaarverslag Proefboederij Wijnandsrade 1993)

Perceels-code	Bodem-bedekker[1]	Hoofd-gewas	Inzaai-methoden[2]	Helling-lengte (m)	Hellings-hoek (%)
1	wintertarwe	suikerbieten	D,M,P	65	9,1
2	gele mosterd	suikerbieten	D,M	90/130	10,5/15
3	ital, raaigras	suikerbieten	M,P	200	4,2
10	winterrogge	snijmaïs	D,M,P	40	11,2
11	winterrogge	snijmaïs	D,P	80	12,5

[1] de bodembekkers gelden alleen voor de gedeelten met direct- en mulchzaai
[2] D, M, P zijn resp. direct-, mulch- en praktijkzaai

Locatie 1, suikerbieten

Op deze locatie is tijdens het noodweer van begin mei ernstige erosie opgetreden. Tijdens deze extreme neerslaggebeurtenis (neerslagmeting: 51 mm) werden de opvangbakken op het praktijk- en mulchgedeelte geheel opgevuld met bodemmateriaal. Op het gedeelte met directzaai was het bodemverlies beduidend minder. De erosiemetingen van de periode daarna laten zien dat het praktijkgedeelte consequent het meeste waterafvoer geeft, directzaai het minst. Tegen het einde van de meetperiode zijn de sedimentconcentraties van het afstromende water echter zo laag, dat ook op het praktijkgedeelte het bodemverlies gering is.

Op deze locatie heeft het mulchzaaisysteem dus geen erosiebeperkend effect gesorteerd. Hierbij moet worden aangetekend dat de bedekkingsgraad van de wintertarwe op het moment van mulchen erg gering was. Directzaai heeft over het gehele groeiseizoen het bodemverlies met tenminste 97% gereduceerd.

Locatie 3, suikerbieten

Ook op deze locatie heeft het onweer van begin mei (neerslag: 43,7 mm) erosie veroorzaakt. Hier heeft het mulchsysteem wel duidelijk een erosiebeperkend effect gehad. De overige erosiegebeurtenissen, die allen veel minder extreem waren, geven geen belangrijke verschillen te zien. Over het gehele groeiseizoen gezien is de reductie van waterafvoer en bodemverlies resp. 65% en 84% a.g.v. mulchzaai.

Tabel 5.17 Resultaten perceel 1, groeiseizoen '93

Datum (d/m)	Direct			Mulch			Praktijkperceel		
	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verl. (kg/m)
03-05	>>220	-	6,02	>>220	-	>234	>>220	-	>234
07-06	5,0	2,2	0,01	70,9	14,5	1,03	98,6	10,8	1,06
21-07	0	-	0	3,5	-	≈ 0	17,8	6,3	0,11
17-08	34,9	8,2	0,28	39,4	9,2	0,36	58,7	3,3	0,19
09-09	17,4	3,6	0,06	28,2	4,1	0,12	77,5	1,2	0,09
Totaal	>>277	-	6,37	>>362	-	>236	>>473		>235

Tabel 5.18 Resultaten perceel 3, groeiseizoen '93

Datum (d/m)	Mulch			Praktijkperceel		
	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)
03-05	10,6	14,1	0,15	135,3	19,9	2,70
07-06	<4	-	≈ 0	34,6	1,0	0,03
21-07	11,3	6,0	0,07	7,9	6,0	0,05
09-09	35,1	5,4	0,19	35,9	3,5	0,13
Totaal	77,9		0,48	225,1		2,96

Locaties 2, 10 en 11

Op de kleefaardepercelen 2 en 10 is tijdens het groeiseizoen nauwelijks erosie opgetreden. Dit geldt ook voor perceel 11. Effecten van teeltsystemen zijn dan ook niet aantoonbaar op basis van deze gegevens.

Tabel 5.19 Resultaten percelen 2, 10 en 11, groeiseizoen '93

Perceels-code	Direct			Mulch			Praktijkperceel		
	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verlies (kg/m)	Water afvoer (l/m)	Sed. conc. (g/l)	Bodem verl. (kg/m)
2	8,6	5,8	0,05	37,7	2,7	0,10		n.v.t.	
10	18,5	3,7	0,07	26,0	3,8	0,10	14,1	5,8	0,08
11	18,5	2,8	0,05		n.v.t		20,1	7,4	0,15

5.3.6 Vergelijking resultaten demonstratieproject/proefveldonderzoek

Directzaai

Op lösspercelen reduceert directzaai van bieten of maïs in een bodembedekker het bodemverlies en ook waterafvoer gedurende het groeiseizoen sterk. Tabel 5.20 geeft aan in welke mate waterafvoer en bodemverlies worden gereduceerd door de erosiebeperkende teeltsystemen met directzaai.

Tabel 5.20 Waterafvoer en bodemverlies op de meetlocaties met directzaai

Meet-jaar	Perceels-code	Waterafvoer			Bodemverlies		
		Praktijk (l/m)	Demo (l/m)	Reductie (%)	Praktijk (kg/m)	Demo (kg/m)	Reductie (%)
1992	4	406,7	175,2	57	30,5	5,4	82
1992	7	-	-	-	-	-	-
1992	11	404,2	59,6	85	14,6	0,1	99
1992	13	>580	107,9	>81	21,9	0,5	98
1993	1	>>473	>>277	?	>235	6,4	>97

Tabel 5.21 Reducties van waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door directzaai en mulchzaai zoals gemeten op erosieproefvelden

	Reductie t.o.v. gangbaar teeltsysteem (%)					
Gewas	Waterafvoer		Bodemverlies		Spaterosie	
	direct	mulch	direct	mulch	direct	mulch
Maïs	11	0	77	70	68	48
Bieten	28	-10	94	68	69	48

Uit tabellen 5.20 en 5.21 blijkt dat het directzaaisysteem op de betreffende demonstratiepercelen beter heeft gewerkt dan op grond van het teeltsystemenonderzoek verwacht mocht worden, vooral wat betreft de reductie van waterafvoer. Door de grotere hellinglengte op de demonstratiepercelen treedt een cumulatief effect op.

Het positieve effect van directzaai op infiltratie van regenwater hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de bodem vanaf de inzaai van de bodembedekker in het najaar de tijd krijgt voor structuurontwikkeling. Hierbij spelen de wortels van de bodembedekker en het bodemleven een belangrijke rol. Ondanks een compacte bovengrond ontstaat er een gunstige poriestructuur die bij de inzaai van het hoofdgewas in het voorjaar niet verstoord wordt door diepere grondbewerking of een zaaibedbereiding. Regenwater kan hierdoor snel en diep infiltreren. De wielsporen vormen hierop een uitzondering.

De relatief goede infiltratie is één oorzaak voor de sterke reductie van het bodemverlies. Daarnaast spelen de resten van de bodembedekker een rol: zij beschermen het bodemoppervlak tegen regendruppelinslag en verhogen de oppervlakteruwheid waardoor afstromend water wordt afgeremd. Hierdoor worden minder bodemdeeltjes losgemaakt en neemt de transportcapaciteit van het stromende water af. Daarnaast werkt de hoge (micro)biologische activiteit, als gevolg van de aanwezige plantenresten, bodem-stabiliserend.

Mulchzaai

In welke mate mulchzaai erosiebeperkend werkt, komt minder duidelijk naar voren uit de meetgegevens (tabel 5.22). Op de ene locatie heeft mulchzaai een erosiebevorderd effect gehad, op de andere een erosiebeperkend effect.

Tabel 5.22 Waterafvoer en bodemverlies op de locaties met mulchzaai

Meet-jaar	Perceels-code	Waterafvoer			Bodemverlies		
		Praktijk (l/m)	Demo (l/m)	Reductie (%)	Praktijk (kg/m)	Demo (kg/m)	Reductie (%)
1992	5	73,0	>450	<-516	0,3	2,1	-600
1993	1	>>473	>>362	?	>235	>236	?
1993	3	225,1	77,9	65	3,0	0,5	84

Uit de metingen op de erosieproefvelden blijkt dat mulchzaai wel degelijk bodemverlies kan beperken (tabel 5.21). Echter, het probleem van afstromend water wordt met mulchzaai niet noemenswaardig beperkt of soms zelfs versterkt. Bij extreme neerslag en grotere hellinglengte (zoals op de demonstratiepercelen) wordt de hoeveelheid en de kracht van het afstromende water zo groot dat de gewasresten van de bodembedekker onvoldoende weerstand bieden en serieuze erosie kan optreden. Dat de waterafvoer bij mulchzaai niet wordt beperkt komt waarschijnlijk doordat tijdens het ineggen van de bodembedekker de dieper doorlopende poriën worden afgesneden. Water kan daardoor goed infiltreren in de geëgde bovenlaag, maar zal daarna blijven steken. Plasvorming en afstroming van water treden dan eerder op. De poriestructuur zal zich in de loop van het groeiseizoen herstellen. Echter, het gevaar voor bodemerosie en daardoor veroorzaakte gewasschade is juist in het vroege groeiseizoen het grootst.

De bedekking van het wintergewas speelt ook een grote rol bij mulchzaai. Uit de metingen blijkt dat bij een geringe bedekkingsgraad mulchen geen erosiereductie veroorzaakt, terwijl bij dezelfde bedekkingsgraad directzaai wel erosiebeperkend werkt. In een situatie waarbij de suikerbieten vroeg kunnen worden gezaaid, zal met name de bedekkingsgraad van wintertarwe vaak nog te klein zijn voor mulchzaai.

5.3.7 Conclusies

Metingen gedurende zowel de winterperiode als het groeiseizoen tonen aan dat het erosiegevaar op kleefaardepercelen beduidend kleiner is dan op lössgrond. Zelfs op een zeer steile en lange helling trad nauwelijks erosie op. Teeltsystemen als directzaai en mulchzaai hebben hier geen aantoonbaar erosiebeperkend effect.

Directzaai beperkt de hoeveelheid afstromend water en bodemverlies sterk op alle meetlocaties gedurende het groeiseizoen. Dit blijkt ook het geval bij extreme neerslag. Op grond van de metingen op de demonstratiepercelen zijn er onvoldoende aanwijzingen dat mulchzaai erosie effectief beperkt. Op de erosieproefvelden met geringe hellinglengte is wel duidelijke beperking van het bodemverlies gemeten, maar niet van de waterafvoer welke soms juist groter is. Het is de verwachting dat hierdoor bij langere hellingen serieuze erosie mogelijk blijft.

5.4 Water- en sedimentinvang door groenstroken

5.4.1 Inleiding

Op dichtbegroeide oppervlakken met grasachtige vegetatie treedt geen of nauwelijks erosie op. Daarbij scheppen grasoppervlakken de benodigde condities voor sedimentatie van bodemdeeltjes die worden meegenomen met afstromend water afkomstig van hoger gelegen hellingdelen. Dit maakt gras tot een potentiële maatregel voor de beperking van erosie en modderoverlast.

Onderzoek dat betrekking heeft op dit onderwerp is voornamelijk uitgevoerd in de Verenigde Staten. Hieruit komt naar voren dat gras een doeltreffende erosie-beperkende maatregel kan zijn. Het is vooralsnog niet bekend in hoeverre onderzoeks-materiaal uit buitenlandse literatuur geldig is voor de situatie in Zuid-Limburg. Om vast te stellen of groenstroken in Limburg een rol kunnen spelen is een experimenteel onderzoek uitgevoerd dat in dit hoofdstuk wordt beschreven.

De *doelstelling* van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in het water- en sedimentopnemend vermogen van grasland onder condities die zich voordoen in Zuid-Limburg.

Hierbij zijn de volgende onderzoeksdoelen te onderscheiden:
— het testen en ontwikkelen van de meetmethode;
— het uitvoeren van een serie metingen onder veldomstandigheden;
— nagaan in hoeverre de verschillende variabelen van invloed zijn op het proces van water- en sedimentinvang.
Het onderzoek is in de periode april-juni 1993 uitgevoerd op twee locaties in Zuid-Limburg.

5.4.2 Literatuurgegevens

Over het gebruik van gras in de bodem- en waterconservering is vrij veel gepubliceerd, vooral in de Verenigde Staten. Uit deze publicaties blijkt dat gras, voor beperking van erosie, op nogal uiteenlopende manieren kan worden gebruikt. Grofweg is de volgende vierdeling te maken:
— grasbarrières of grashagen (eng.: grass hedges);
— filterstroken of grasstroken (eng.: filter strips, grass strips);
— graszones (eng.: buffer zones, buffer strips);
— grasbanen.

Grasbarrières
Grasbarrières zijn smalle *permanente* stroken van stug, rechtopstaand hoog gras bedoeld voor de ontwikkeling van terrassen, invang van sediment en spreiding van geconcentreerd water. Ze zijn 0.3 tot 1 m breed en daarmee veel smaller dan traditionele grasstroken (Dabney et al., 1993). De grasbarrières worden evenwijdig aan de hoogtelijnen aangelegd. Essentiële karakteristieken van geschikte grassoorten zijn de stugge stam, die niet ombuigt zodra er water in het gras stroomt, en voldoende

dichtheid om het water af te remmen en op te stuwen. Water dat al dan niet geconcentreerd afstroomt, verzamelt zich tegen de barrière en stroomt er geleidelijk doorheen naar het ondergelegen akkerdeel. Sedimentfiltering vindt niet zozeer plaats in het gras, als wel in de plas die zich hellingopwaarts van de barrière bevindt (figuur 5.4).

Het effect op de water afvoer is drieledig. Ten eerste, door de vorming van vele kleine waterbuffers op de helling, wordt de totale afvoer over een langere periode uitgespreid. Dit betekent een afname van de piekafvoer en een kleinere kans op wateroverlast. Ten tweede spreidt het water zich in de breedte langs de barrière waardoor geulerosie minder kans krijgt. Ten derde neemt infiltratie toe door de twee bovengenoemde effecten.

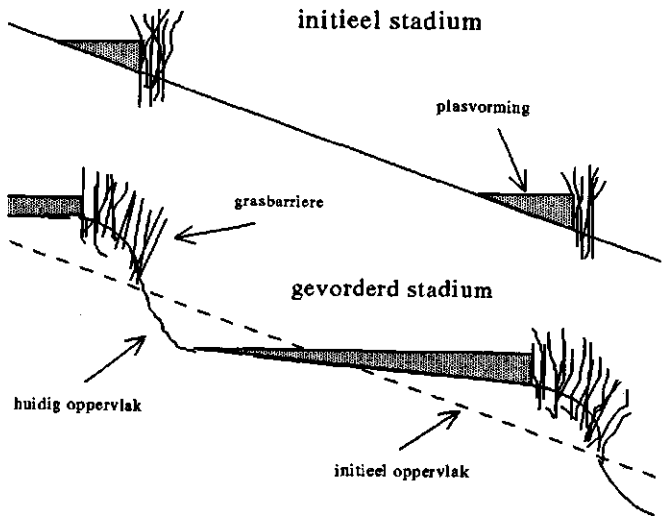


Fig. 5.4 Een schematisch profiel van grasbarrières op een helling in verschillende stadia van ontwikkeling (naar Kemper et al., 1992)

Veel materiaal wordt stroomopwaarts van de barrières afgezet. Dit benadrukt het belang van een stugge grassoort en maakt tevens duidelijk dat een smalle strip reeds zeer effectief sediment kan invangen. De weerstand van de barrière wordt vergroot doordat gewasresten zich ophopen aan de voorzijde van de groenstrook. Dit draagt bij aan de waterbufferwerking stroomopwaarts van de strook en het vertragen van de uitstroom naar lagere delen. Soms kan het water echter door de zoden heen breken. Meestal als gevolg van holen van knaagdieren die subsurface stroming en 'tunneling' in de hand werken. Wanneer dit gebeurt neemt het erosiegevaar sterk toe (Kemper et al., 1992). Onderhoud is daarom zeer belangrijk (Dabney et al., 1993).

Enkele getallen illustreren de mate waarin grasbarrières erosie beperken. Thomas (1988) rapporteerde een afname in bodemverlies van bijna 70% en in waterafvoer van 50% op een helling van 10%. McGregor en Dabney (1993) vonden aan de onderzijde van een 22 m lang runoff plot waarop één barrière was aangebracht, een afname van 40% in bodemverlies in het eerste groeiseizoen en 75% in het derde. Samenvattend kan gesteld worden dat grasbarrières in staat zijn erosie en wateroverlast te verminderen. Een belangrijk voordeel is het beperkte ruimtebeslag door de geringe breedte van de stroken. Deze geringe breedte maakt het ook een

kwetsbare maatregel: om doorbraak van de barrières te voorkomen dienen de stroken zeer precies de hoogtelijnen te volgen, moeten de barrières goed onderhouden worden en kunnen alleen zeer stugge dichte grassoorten gebruikt worden.

Filterstroken

Filterstroken zijn stroken met een zodevormend gewas (b.v gras). Ze volgen min of meer de hoogtelijnen en worden afgewisseld met stroken bouwland. De breedte van de stroken genoemd in de literatuur varieert sterk, maar ligt meestal tussen de 1 en 25 meter. Filterstroken worden niet alleen toegepast voor het filteren van sediment maar ook voor verwijdering van nutriënten uit het afstromende water (Dillaha et al., 1989). Ze kunnen bestaan uit permanente vegetatie, maar ook kan het zodevormende gewas worden opgenomen in de gewasrotatie. Filterstroken veranderen de hydraulische eigenschappen van de stroming (Dillaha et al., 1987) waardoor:

— de mogelijkheid voor infiltratie verbetert;
— sedimentatie toeneemt (stroomsnelheid en transportcapaciteit nemen af);
— filtratie van gesuspendeerd materiaal door vegetatie toeneemt;
— adsorptie aan plant- en bodemoppervlak toeneemt;
— absorptie van opgeloste stoffen door planten toeneemt.

Deze mechanismen werken alleen als het water *langzaam* door het filter stroomt; dan is de contacttijd groot genoeg en kunnen de 'filtermechanismen' hun werk doen. Het filtratie- en absorptiemechanisme zijn minder goed bekend dan sedimentatie en infiltratie. Filtratie werkt waarschijnlijk vooral op grotere bodemdeeltjes en aggregaten, terwijl absorptie belangrijker is bij de verwijdering van opgeloste stoffen. Wilson (1967) gaf aan dat de volgende faktoren de filterwerking bepalen:

— filterbreedte;
— sedimentgehalte van het instromende water;
— stroomsnelheid;
— hellingshoek;
— grashoogte;
— grasdichtheid;
— de mate van onderdompeling van het gras.

Neibling en Alberts (1979) deden plotonderzoek met een regensimulator op een helling van 7% en met stroken tussen de 0,6 en 4,9 m breed. Alle stroken reduceerden de sedimentafvoer met 90%. De hoeveelheid klei die werd verwijderd bleek een duidelijke functie van de strookbreedte. Bijna al het sediment werd afgezet aan de bovenrand van de strook en in de eerste 0.6 m van de strook. Onderzoekers uit Kentucky ondervonden dit ook, met de aantekening dat als gevolg van accumulatie van sediment (in het bovenste deel van de strook) de filterwerking afneemt en sedimentatie steeds lager in de groenstrook plaatsvindt.

Line (1991) onderzocht sedimentinvang van stroken raaigras met een breedte van 1,5, 3 en 6,1 m. De strook van 1,5 m verwijderde 40 tot 80% uit de afvoer, de invang van de stroken van 3 en 6,1 m varieerde tussen 72 en 95%. Ook concludeerde Line dat de invangeffectiviteit voor bodemdeeltjes kleiner dan 125 μm afneemt met toenemend debiet.

Dillaha et al. (1987) deden onderzoek met een regensimulator en kwamen tot de volgende resultaten. Een filter van 9,1 m breedte reduceerde sedimentafvoer met gemiddeld 91%, een filter van 4,6 m gaf 81% reductie. Het bovenste deel van het filter was het meest effectief. Dit blijkt uit het feit dat verdubbeling van de breedte slechts 10% extra reductie geeft. Sediment werd afgezet aan de rand van de strook waar de diepte van het water toeneemt als gevolg van de weerstand van de vegetatie. Hierdoor ontstond plasvorming in en bovenstrooms van de strook. Ook het hellingafwaarts bewegen van het sedimentatie-front in de strook werd waargenomen. De conclusies van Dillaha et al. (1987) waren:

— grasstroken filteren sediment effectief als er een dunne waterlaag doorheen stroomt en het filter niet eerder is opgevuld met sediment;
— de effecitiviteit neemt af met de tijd door sedimentaccumulatie. Of dit in werkelijkheid ook zo is, is niet duidelijk. Mogelijk groeit het gras vrij snel door het sediment heen en herstelt de filterwerking zich.

Verschillende onderzoekers melden dat de invangeffectiviteit sterk afneemt zodra het water geconcentreerd (met grotere waterdieptes) het filter instroomt en het gras in verdronken toestand komt, zoals dat bij afvoer door grasbanen vaak gebeurt (Neibling en Alberts, 1979; Magette et al., 1987; Vuurmans en Gelok, 1993). Volgens Vuurmans en Gelok (1993) neemt de weerstand van het gras tegen afstroming plotseling af bij grotere waterdieptes zodra het gras ombuigt als gevolg van de hogere stroomsnelheid. Zodra het gras ombuigt neemt de stroomsnelheid extra toe: het gras fungeert als een 'springplank' (Vuurmans en Gelok, 1993). Sedimentatie krijgt in deze situatie minder kans.

Concentratie van oppervlakkig afstromend water treedt in de praktijk vooral op bij akkers met *grotere hellinglengtes*. Het water zal de natuurlijke drainagebanen zoeken en de filterstrook op een beperkt aantal plaatsen bereiken als geconcentreerde stroming (Dillaha et al., 1989). Er zal minder bodemmateriaal sedimenteren dan op grond van proefveldresultaten mag worden verwacht. Dit werd ook in de praktijk geconstateerd. Resultaten van on-farm metingen waren in de meeste gevallen teleurstellend (Dillaha et al., 1989). Dillaha et al. (1989) stellen dan ook dat 'unless vegetated filter strips can be installed so that concentrated flow is minimized, it is unlikely that they will be very effective for agricultural nonpoint source pollution control' (hetgeen o.a. sedimentinvang inhoudt). Om de kans op geconcentreerde instroming in de filterstrook te beperken dienen filterstroken zo precies mogelijk de hoogtelijnen te volgen en de afstanden tussen de stroken beperkt te zijn.

Het *effect van de filterstroken op afvoerhoeveelheden* wordt in vrijwel geen van de publicaties expliciet behandeld. Edwards et al. (1983) vonden dat de afvoer, na een filterstrip te hebben doorlopen, soms hoger was dan de afvoer hellingopwaarts van de strook bij het instroompunt. Opmerkelijk is dat ook Magette et al. (1987) dit melden. De verklaring werd gezocht in de hogere bodemvochtgehaltes in de filterstrip, waardoor de infiltratie kleiner is dan op de akkerstrook.

Enkele vereisten waaraan het filtergras moet voldoen zijn (Wilson, 1967):

— een diep wortelsysteem;
— dichte, goed vertakte bovengroei;

— weerstand tegen overstromen en droogte;
— in staat zijn door te groeien na afdekking door sediment.

Vuurmans en Gelok (1993) noemen, in verband met eventueel ombuigen van gras bij sterke stroming, de ouderdom van het gras als belangrijke factor. Jong gras is flexibel en buigt eerder om dan ouder stugger gras. Daarnaast is de grasdichtheid van oud gras groter dan van jong gras, wat van invloed is op de weerstand die afstromend water ondervindt. Ook zijn verschillen in stugheid en dichtheid te verwachten tussen grassoorten.

Samenvattend kan gesteld worden dat filterstroken of grasstroken de sedimentlast van afstromend water sterk kunnen verminderen en daarmee erosieproblemen kunnen beperken. Invang van sediment neemt toe met toenemende strookbreedte. Echter, de eerste meters van de strook vangen reeds de bulk van het sediment in. Met grote strookbreedtes wordt maar weinig 'winst' geboekt. Onderdompeling van het gras moet worden voorkomen. Bij een geconcentreerde waterstroom is de invangeffectiviteit van de grasstrook slechter. De kans hierop neemt toe met toenemende lengte van de akkerhellingdelen tussen de stroken. Geconcentreerde stroming kan worden voorkomen door de afstand tussen de grasstroken te beperken en door ze zo goed mogelijk de hoogtelijnen te laten volgen. Oud grasland is in principe te verkiezen boven jong grasland waar het de sedimentfilterende werking betreft.

Graszones
Graszones of vegetatiezones zijn stroken van vegetatie die worden aangelegd langs de randen van te beschermen objecten, zoals stuwmeren, rivieroevers e.d. De begroeide zones zijn meestal meer dan 20 m breed, vaak meer dan 100 m. Veelal zijn deze stroken in de eerste plaats aangelegd als nutriëntenfilter (vooral nitraat) ter bescherming van de waterkwaliteit (Nieswand et al., 1990). De processen die spelen zijn gelijk aan die besproken zijn bij de filterstroken.

Grasbanen
Grasbanen worden aangelegd in afvoerbanen in het landschap waar het water zich van nature concentreert en afstroomt. De bedoeling van grasbanen is te voorkomen dat tot afstroming gekomen water tijdens het transport naar de beek of rivier nog verdere erosie veroorzaakt. Het water kan eventueel afkomstig zijn uit bufferbasins (Vuurmans en Gelok, 1993). Bij stroming door grasbanen is sprake van geconcentreerde stroming. De waterdieptes en -snelheden zullen normaal gesproken hoger zijn dan die bij stroming door filterstroken. De filterwerking van grasbanen zal daarom beduidend kleiner zijn dan in geval van 'thin uniform flow' door een filterstrook. De belangrijkste functie van een grasbaan in de dalbodem is dan ook het voorkomen van 'ephemeral gully'-vorming: de vorming van brede ondiepe geulen.

5.4.3 Meetmethoden en meetlocaties

De meetopzet
Het deelonderzoek dat hier besproken wordt is experimenteel van opzet en gericht op het vaststellen van water- en sedimentinvang door *groenstroken*. Het principe van de meetopzet is als volgt. Sedimenthoudend water stroomt over een hellingdeel met bestaand grasland. Boven en onderaan de helling wordt gemeten hoeveel water er op- en respectievelijk afstroomt en wat de sedimentgehaltes zijn. De hellingafwaartse afmetingen worden gevarieerd om de invloed van de strookbreedte te kunnen vaststellen. Met deze methode wordt een situatie nagebootst waarbij water dat tot afstroming komt op een akker (en dus bodemmateriaal meevoert) terecht komt in grasland. Door de weerstand van het gras neemt de stroomsnelheid af en zal meegevoerd bodemmateriaal bezinken. De gebruikte methode wordt hieronder gedetailleerd beschreven (Fig. 5.5).

Vanuit een *watertank* met een inhoud van circa 1400 liter wordt het water via een meetgoot (een HS-flume) in een metalen *mengbak* geleid. In de mengbak van 200 liter bevindt zich een vaste hoeveelheid löss (circa 30 kg). Middels een *dompelpomp* en door op geregelde tijdstippen te roeren worden het water en het sediment (löss) gemengd. Het sediment-houdende water loopt over de horizontale rand van de volle mengbak in een lager gelegen, dwars op de helling staande *overloopgoot* van 1 m breed welke eveneens horizontaal staat opgesteld. Met de overloopgoot worden golfbewegingen in de mengbak zo veel mogelijk teniet gedaan en wordt het sedimenthoudende water evenredig over de breedte verdeeld. Bovendien is de overloopgoot eenvoudiger horizontaal te stellen dan de mengbak.
Op de helling zijn met metalen schotjes twee *stroken* afgeperkt. Bij de meeste proeven zijn twee stroken gebruikt van 0,5 m breed, ook is bij een aantal proeven een strook van 1 meter breed gebruikt. De plots hadden per proef verschillende lengten. Vanuit de overloopgoot valt het water op de stroken en stroomt binnen de begrenzingen van de schotjes in de richting van de helling naar beneden.

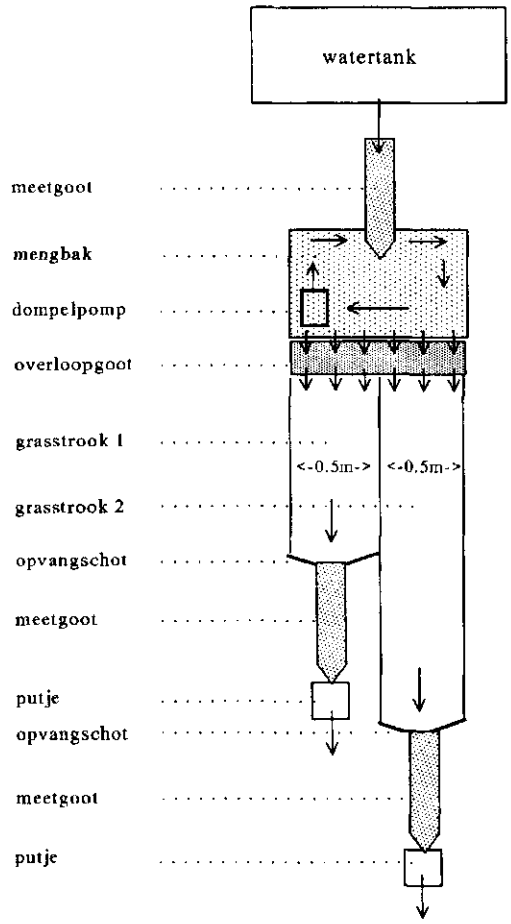


Fig. 5.5 Bovenaanzicht van de meetopstelling (toelichting: zie tekst)

Aan het einde van de strook wordt het water via een *opvangschot* in een ingegraven meetgoot geleid, welke uitmondt in een putje ten behoeve van de monstername. Hierna stroomt het verder de helling af.

Het in- en uistroomdebiet werd iedere twee minuten geregistreerd door meting van de waterhoogten in de meetgoten. Het sedimentgehalte van het in- en uitstromende water werd door middel van bemonstering bepaald (iedere 4 à 5 minuten). De meeste proeven duurden 45 minuten.

Naast metingen van het debiet en het sedimentgehalte worden voor de uitvoering van de proef de volgende dingen gemeten en genoteerd:
— hellingshoek;
— gemiddelde graslengte;
— debietinstelling;
— voorbevochtiging; in enkele gevallen bleek het nodig om de stroken voor te bevochtigen in verband met droogte;
— vochtgehalte; voor en na de proef zijn pF-ringmonsters genomen, deze zijn ook gebruikt voor de bepaling van de porositeit.

Het gemiddelde instroomdebiet was 0,35 l/s/m. Het is niet mogelijk een vaste waarde te geven voor de herhalingstijd van een bui die dit debiet gedurende 45 minuten zal kunnen veroorzaken, omdat een dergelijk debiet door verschillende combinaties van omstandigheden tot stand kan komen. Immers, het debiet hangt behalve van de neerslagintensiteit ook af van het afvoerpercentage (bepaald door bodemvariabelen als oppervlaktebergingscapaciteit, infiltratiecapaciteit, bodemvochtgehalte en verslempingsgraad) en de hellinglengte van de bovengelegen akker. Ter indicatie: bij een afvoerpercentage van 20% en een hellinglengte van 150 m wordt na het verstrijken van de concentratietijd een evenwichtsdebiet van 0,35 l/s/m bereikt bij een bui met een intensiteit van ca. 40 mm/uur (herhalingstijd 10 jaar bij een duur van 45 minuten). Een dergelijke bui geeft hetzelfde debiet bij een afvoerpercentage van 30% op een 100 m lange helling. Indien het water in enige mate geconcentreerd afstroomt van de akker boven de groenstrook, wordt het debiet van 0,35 l/s/m plaatselijk al bereikt tijdens buien met een lagere herhalingstijd dan 10 jaar.

De sedimentconcentratie van het instromende water tijdens de proeven was gemiddeld 10-20 g/l. Aan het begin van de proeven was het meestal 40-70 g/l. Deze waarden zijn goed vergelijkbaar met de gemeten sedimentconcentraties in de sub- en hoofdstroomgebieden.

Gegevensverwerking

Op de proefboerderij te Wijnandsrade zijn de verkregen sedimentmonsters en pF-ringen verwerkt. De gegevens van het debiet konden rechtstreeks verwerkt worden. Figuur 5.6 geeft een voorbeeld van het verloop van het debiet en de sedimentconcentraties tijdens een proef. De totale hoeveelheid uitgestroomd water is gelijk aan de oppervlakte onder de waterafvoercurve. De totale hoeveelheid uitgestroomd sediment is gelijk aan de de oppervlakte onder de sedimentafvoercurve welke het produkt is van sedimentconcentratie en debiet. Het berekenen van het debiet en sedimentconcentratie van de invoer gebeurde op dezelfde wijze.

Meetlocaties

Er zijn proeven uitgevoerd op twee locaties, nabij Ransdaal op jong (2 jaar) grasland (kunstweide, intensief bereden, injectiesporen), en nabij Voerendaal op oud (meer dan 15 jaar) grasland (weide, extensief begraasd, niet bereden). De gemiddelde hellingshoek bij Voerendaal was groter dan die bij Ransdaal. Het effect van de ouderdom van het gras en het beheer komt nadrukkelijk tot uiting in de porositeit van de bovengrond:

— jong intensief gebruikt grasland, locatie Ransdaal: porositeit 48%;
— oud extensief gebruikt grasland, locatie Voerendaal: porositeit 59%.

In de navolgende tekst worden deze locaties aangeduid met 'jong grasland' en 'oud grasland'. Men dient zich echter tevens het verschil in beheer te realiseren.

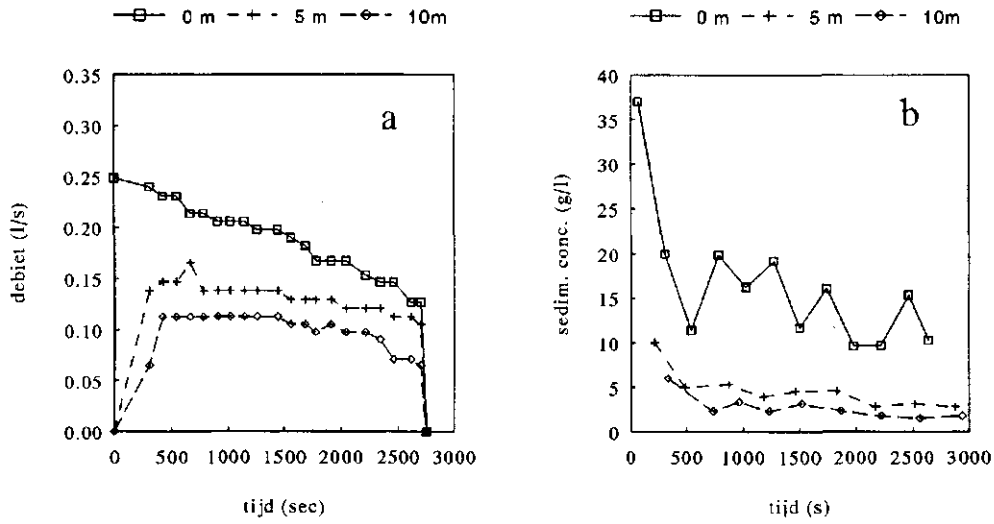


Fig. 5.6 Het verloop van het debiet (a) en de sedimentconcentratie (b) tijdens een veldproef bij twee verschillende strookbreedtes (5 en 10 m) en bij afwezigheid van een strook (0 m, ofwel het instromend water)

5.4.4 Resultaten

Een overzicht van de onderzoeksresultaten is te vinden in aanhangsel 4. Bij de interpretatie van de gegevens dient met de volgende punten rekening te worden gehouden.

— Regen: in het natuurlijke proces speelt neerslag een rol. Druppelinslag in een laag water die afstroomt zorgt voor extra turbulentie en doet infiltratie gedeeltelijk teniet. Hierdoor wordt in de proeven de invang van water en sediment door gras mogelijk overschat.
— De stroomsnelheid van het instromende water: water afkomstig van een akkerstrook heeft een bepaalde snelheid op het moment dat het de groenstrook instroomt. Deze snelheid zal hoger zijn dan de beginsnelheid van het water bij de proeven. Hierdoor kunnen de werkelijke hoeveelheden sedimentatie op de groenstroken geringer zijn.
— Door de dubbele horizontale overloop (mengbak en overloop goot) mag worden aangenomen dat de verdeling van het water over de twee stroken gelijk is. Onvoorspelbare golfbewegingen echter maken een kleine variatie hierin mogelijk.
— Hoewel de schotjes waarmee de stroken zijn afgeperkt 1 tot 2 cm in de grond staan is het toch mogelijk dat, door het microrelief en ondergrondse stroming, water heeft gelekt naar de omgeving of naar een andere strook.
— Het initieel vochtgehalte van de stroken verschilt tussen de proeven. Hierdoor zijn de proeven onderling minder goed met elkaar te vergelijken.
— De aanwezigheid van mestinjectiesporen op de locatie met jong grasland kan het proces van afstromen beinvloeden.

Het lag niet in de mogelijkheden om de invloed van alle faktoren expliciet te onderzoeken. Er is bij de proeven naar gestreefd om van de belangrijkste faktoren globaal de effecten op water- en sedimentinvang vast te stellen.

Effect op sedimentconcentratie

Op beide locaties is de breedte van de groenstrook significant van invloed op de sedimentconcentratie van het uitstromende water (tabel 5.23, figuur 5.7). Variantieanalyse geeft voor jong en oud grasland significantieniveaus van resp. 0.0001 en 0.0009. Voor alle strookbreedtes is de uitstroomconcentratie bij oud grasland iets lager dan die van jong gras.

Tabel 5.23 De gemiddelde sedimentconcentratie van uitstromend water bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal tussen haakjes is het aantal experimenten. Per experiment zijn 6 tot 12 sedimentmonsters per strook genomen

Strookbreedte (m)	Gemiddelde sedimentconcentratie van uitstroom (g/l) jong grasland	oud grasland
1	11,08 (2)	9,38 (1)
4	7,16 (2)	5,00 (1)
5	4,28 (5)	3,13 (5)
10	1,89 (6)	1,72 (2)

De invloed van de *hellingshoek* die onderzocht is op het jonge grasland was niet significant, al zijn de sedimentconcentraties bij 5.2 graden beduidend hoger dan bij de kleinere hellingshoeken. De proeven waarbij het *debiet* werd gevarieerd geven geen verschillen in uitstroomconcentratie te zien.

De gemeten sedimentconcentraties kunnen goed worden benaderd met behulp van de volgende vergelijking, die vergelijkbaar is met de relatie die Dickey en Vanderholm (1981) gebruikten:

$$C_{uit} = a \cdot C_{in} \cdot b^{B} \qquad (5.1)$$

waarin: C_{uit} = sedimentconcentratie van uitstromend water (g/l)
C_{in} = sedimentconcentratie van instromend water (g/l)
B = breedte van de grasstrook (m)
a,b = parameters.

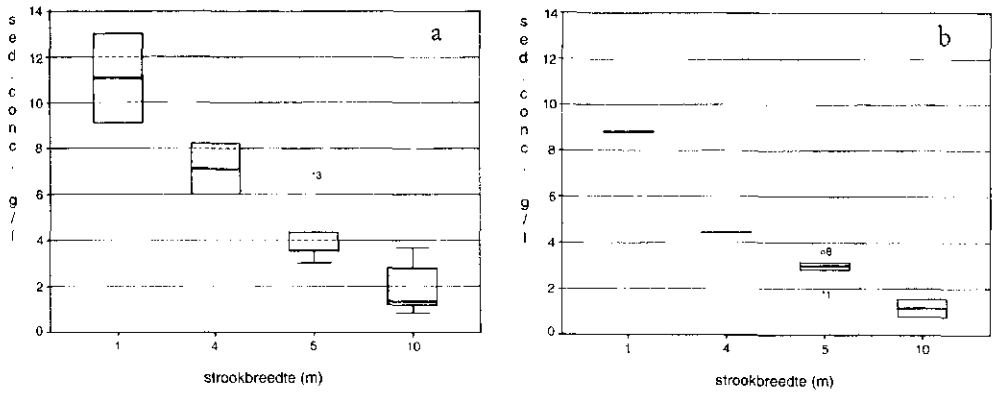


Fig. 5.7 Boxplots van gemeten sedimentconcentraties van de afvoer bij vier grasstrookbreedtes op een locatie met jong grasland met intensief beheer (a), en een locatie met oud grasland met extensief beheer (b). In deze plots is het volgende weergegeven: de mediaan, de 25 en 75 percentilewaarden (de box), de meetrange met uitzondering van de 'outliers' welke als afzonderlijke punten zijn aangegeven

Voor beide locaties zijn de parameters a en b geschat door middel van niet-lineaire regressie. De resultaten staan in tabel 5.24.

Tabel 5.24 Geoptimaliseerde parameters van vergelijking 5.1 voor de schatting van de sedimentconcentratie als functie van de strookbreedte en de instroomconcentratie. Tussen haakjes staan de standard errors van de geschatte parameters vermeld

Graslocatie	a	b	R^2	n
Jong	0,581 (0,049)	0,876 (0,020)	0,96	15
Oud	0,523 (0,048)	0,848 (0,024)	0,90	9

In figuur 5.8a worden gemeten en berekende sedimentconcentraties met elkaar vergeleken. De resultaten uit tabel 5.24 zijn gebruikt om het effect van de grasstroken te berekenen bij drie verschillende instroomconcentraties (figuur 5.8b). Te zien is dat bij toenemende instroomconcentratie het verschil in invang tussen jong en oud grasland groter wordt.

Effect op waterafvoer

De gemeten reducties in waterafvoer zijn minder eenduidig dan de reducties in sedimentconcentratie. Tabel 5.25 geeft voor de onderzochte strookbreedtes de range aan van de gemeten waterafvoer (als percentage van de instroom). De resultaten zijn in grafiekvorm te vinden in figuur 5.9.

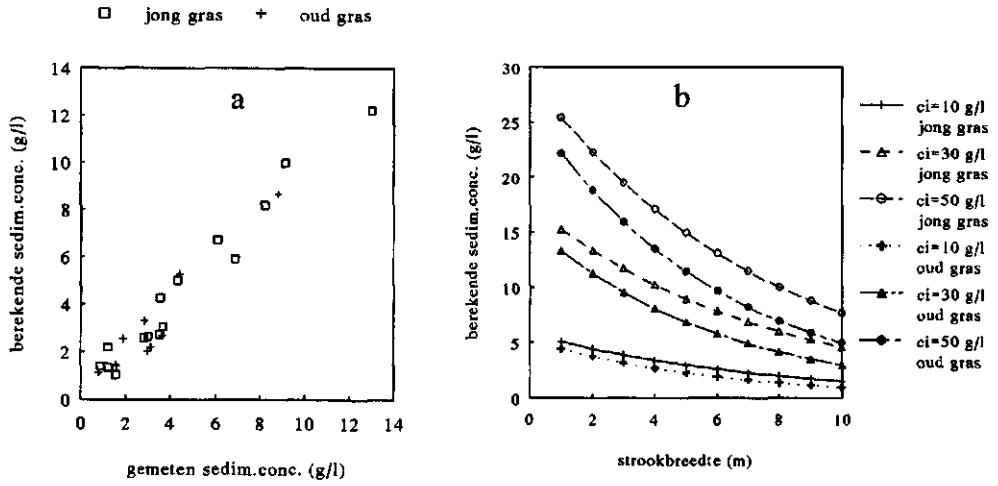


Fig. 5.8 a. de relatie tussen gemeten en met vergelijking 5.1 berekende sedimentconcentraties; b. resultaten van met vergelijking 5.1 berekende uitstroomconcentraties als functie van de grasstrookbreedte bij drie verschillende instroomsedimentconcentraties (ci)

Tabel 5.25 De range in wateruitstroom uitgedrukt als percentage van de instroom bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal tussen haakjes is het aantal waarnemingen

Strookbreedte (m)	Range van waterafvoer (% van instroom) jong grasland	oud grasland
1	100 (2)	92 (1)
4-5	50 - 100(7)	50 - 80 (6)
10	5 - 72(6)	10 - 34 (2)

Variaties kunnen worden veroorzaakt door verschillen in intiële vochtgehaltes, hellingshoeken, ruimtelijke verschillen in infiltratiecapaciteit en meetfouten. Ook hier lijkt, ondanks de steilere helling en de gemiddeld hogere intiële bodemvochtgehaltes, het oude grasland meer effect te sorteren dan jong grasland. Echter, door het geringe aantal waarnemingen en de grote spreiding in de resultaten zijn de verschillen tussen de twee graslanden statistisch gezien niet significant.

Een kleinere hellingshoek lijkt het waterinvangend vermogen van de grasstroken iets te vergroten. Door de kleinere hellingshoek neemt de stroomsnelheid af en is er meer gelegenheid voor infiltratie. Ook dit effect is echter statistisch niet significant.
De invloed van het instroomdebiet op de invang van water lijkt zeer klein te zijn, tenminste, voor de range van onderzochte debieten. Voor de proeven 16, 17 en 18, waarbij instroomdebieten van 0,5, 0,75 en 1,0 l/m/s zijn gebruikt, bedroeg de totale waterafvoer ongeveer 80% van de ingevoerde hoeveelheid.

Voor beide locaties is de graslengte niet van invloed op de waterreductie. Dit is te verklaren door geringe waterdiepte in het gras tijdens de proeven. Zolang de waterdiepte relatief klein is ten opzichte van de grashoogte en het gras niet ombuigt door de stroming, heeft de graslengte geen invloed op de betreffende processen.

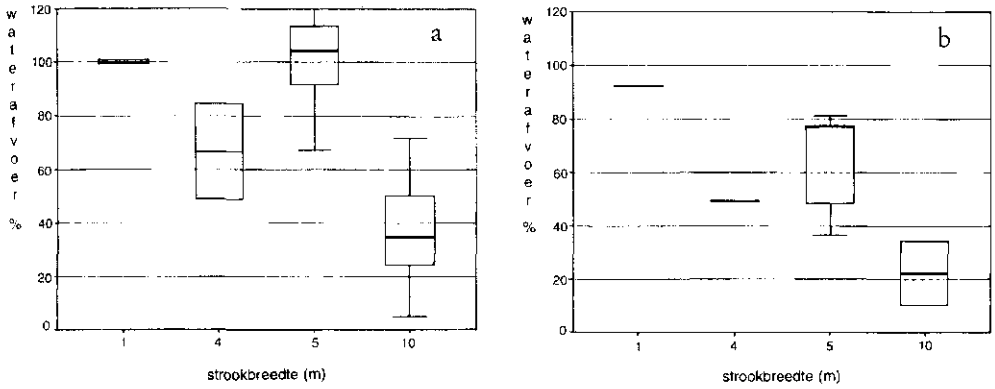


Fig. 5.9 Boxplots van gemeten waterafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij vier grasstrookbreedtes voor relatief jong grasland (a) en oud grasland (b)

De infiltratiecapaciteit lijkt niet de bepalende factor lijkt te zijn voor verschillen in erosiebeperking tussen jong en oud grasland. Er zijn van 6 graslocaties in Zuid-Limburg monsters gestoken van de bovengrond (0-8 cm) ten behoeve van bodemfysische bepalingen. Op grond van de bepalingen in het laboratorium kan geen systematisch verschil worden aangetoond in infiltratiekarakteristieken tussen jong en oud grasland. Vermoedelijk is de grasdichtheid, die de stroomsnelheid bepaald, van meer betekenis. Afstromend water wordt sterker afgeremd door een dichte (oudere) grasmat. Er ontstaat een grotere waterdiepte, sediment bezinkt en de mogelijkheid voor infiltratie neemt toe. Met de verzamelde veldgegevens zijn, met behulp van een methode beschreven door Mohamoud (1992), schattingen gemaakt van de ruwheidscoëfficiënt van Manning. De gemiddelde Manningwaarde voor de locatie met jong grasland bedraagt 0,416 $s/m^{1/3}$ en de standaardafwijking is 0,19 (n=14). Voor het oude grasland is de gemiddelde waarden 0,99 $s/m^{1/3}$ en de standaardafwijking 0,40 (n=8). De berekende gemiddelde dikte van de waterlaag in het gras tijdens de proeven bedroeg 6,8 mm voor de locatie met jong intensief gebruikt grasland en 10,4 mm voor de locatie met oud extensief gebruikt grasland.

Effect op sedimentafvoer

Het effect van een grasstrook op de sedimentafvoer is een combinatie van de effecten op sedimentconcentratie en waterafvoer. Daar de oude extensief gebruikte grasstroken beide sterker reduceerde dan jonge intensief gebruikte grasstroken, geldt dit ook voor de sedimentafvoer (tabel 5.26, figuur 5.10).

Tabel 5.26 De range in sedimentafvoer uitgedrukt als percentage van de instroom bij verschillende grasstrookbreedtes voor twee typen grasland. Het getal tussen haakjes is het aantal waarnemingen

Strookbreedte (m)	Range van sedimentwaterafvoer (% van instroom) jong grasland	oud grasland
1	46 - 55(2)	42 (1)
4-5	16 - 48(7)	6 - 28 (6)
10	0,4 - 16(6)	0,7 - 4 (2)

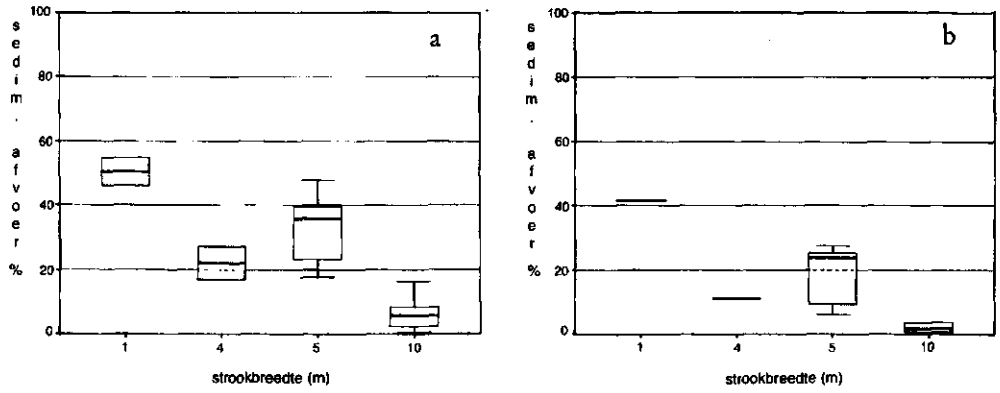


Fig. 5.10 Boxplots van gemeten sedimentafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij vier grasstrookbreedtes op jong intensief gebruikt (a) en oud extensief gebruikt grasland (b)

Naast de strookbreedte beinvloedt ook de hellingshoek de sedimentafvoer (figuur 5.11). De sedimentafvoer is bij 2-3 graden ongeveer 13% van de sedimentinstroom en loopt op tot gemiddeld 35% bij 5,2 graden. Overige variabelen zijn niet of nauwelijks aantoonbaar van invloed op de sedimentafvoer. De sedimentinvang wordt veroorzaakt door de hoge ruwheid en de plotselinge afname van de snelheid van de oppervlakkige afstroming en de afname van de transportcapaciteit.

5.4.5 Conclusies

Grasstroken hebben een duidelijke sedimentfilterende werking. De sedimentconcentratie van water dat uit de grasstrook stroomt kan goed worden beschreven als functie van de inkomende sedimentconcentratie en de strookbreedte.

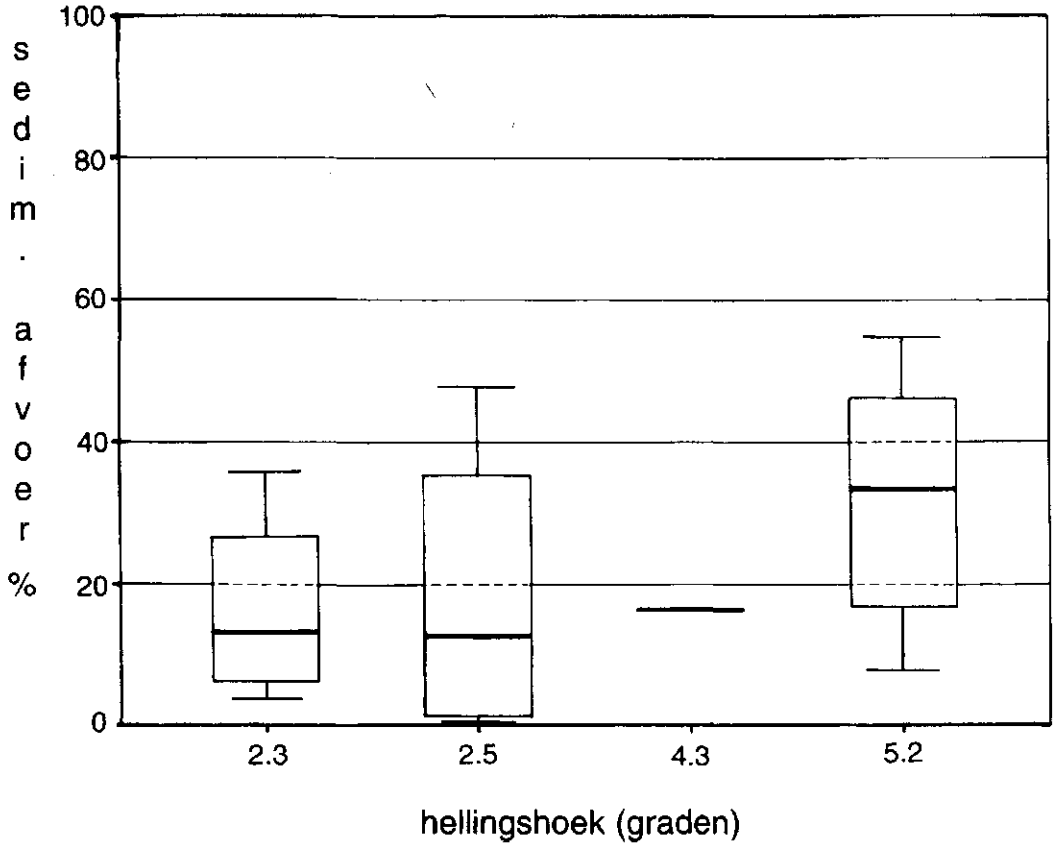


Fig. 5.11 Boxplot van gemeten sedimentafvoeren, uitgedrukt als percentage van de instroom, bij verschillende hellingshoeken (gegevens van jong intensief gebruikt grasland)

De gemeten reducties van de sedimentafvoer varieerden tussen 50% en 60% bij een 1 m brede strook, tussen 60 en 90% bij strookbreedtes van 4 en 5 m en tussen 90 en 99% bij 10 m brede grasstroken. Voor het kwantificeren van de invloed van het debiet op de sedimentfilterende werking zijn meer gegevens nodig. Oud grasland met extensief beheer heeft een iets grotere erosiebeperkende werking dan het onderzochte twee-jarige grasland dat als kunstweide werd gebruikt en veel bereden werd.

De verschillen in wateropname tussen oud extensief gebruikt en jong intensief gebruikt grasland lijken vooral samen te hangen met het verschil in grasdichtheid waardoor stromend water wordt geremd en meer tijd heeft om te infiltreren. De lagere stroomsnelheid in oud extensief gebruikt grasland is tevens de oorzaak van de grotere sedimentfilterende werking.

6 Synthese

6.1 Inleiding

Aan de hand van de metingen op helling-, substroomgebieds- en stroomgebiedsniveau is een integraal beeld ontstaan over het mechanisme van water- en sedimentafvoer in de lössgebieden van Zuid-Limburg. In het algemeen kan gesteld worden dat de metingen op de diverse schaalniveaus, waaronder de continue drukhoogte metingen in het bodemprofiel, in deze context waardevolle, nieuwe, informatie opgeleverd hebben. Hieronder worden een aantal belangrijke punten op een rij gezet.

Uit de metingen blijkt dat wateroverlast in de winter optreedt tijdens en na buien van een zekere omvang: de intensiteit van de neerslag is minder belangrijk. Variaties in het vochtgehalte van de bodem voor de bui, dat in de winter altijd hoog is, bepalen of al bij enkele millimeters neerslag afvoer ontstaat of dat er meer neerslag nodig is om afvoer te genereren. Indien de akkers een geringe bedekking hebben, zal er dan ook erosie optreden.

In de zomer is het vooral de intensiteit van de neerslag die belangrijk is. Indien er een hoge intensiteits bui valt op een relatief onbegroeide bodem, zal er zowel oppervlakkige afstroming als bodemerosie optreden. De lage bedekkingsgraad van de gewassen, alsmede de hogere erosiegevoeligheid van de bodem onder akkerbouwgewassen, spelen een belangrijke rol.

De totale afvoer en de piekafvoer worden beïnvloed door de volgende vier faktoren: (1) buikarakteristieken, (2) intiële vochtgehaltes in het bodemprofiel, (3) de gewasontwikkeling en (4) de condities van het bodemoppervlak (van belang voor o.a. infiltratie en oppervlakteberging).

Bodemverlies hangt nauw samen met de afvoerkarakteristieken, bodembedekking (door het gewas of door vegetatieresten) en de cohesieve condities aan het bodemoppervlak.

6.2 Bodemfysische metingen

Met betrekking tot de continue drukhoogte metingen kan resumerend gesteld worden dat in de drie stroomgebieden:

- het bodemvochtgehalte het meeste varieert in het bovenste deel van het profiel;
- op een diepte vanaf circa 1,5-2,0 m beneden maaiveld het vochtgehalte in het algemeen laag en min of meer constant in de tijd is;
- onderscheiden bodemhorizonten bodemfysisch gezien niet van elkaar blijken te verschillen, met uitzondering van de B-horizont onder grasland;
- door verschillen in teeltsystemen (gewas, grondbewerking e.d.) verschillen ontstaan in de structuur van de toplaag, en dus in bodemfysische eigenschappen;

- deze (ruimtelijke) verschillen in bodemfysische eigenschappen van de toplaag van essentieel belang zijn in het proces van oppervlakkige afstroming in de löss gebieden van Zuid-Limburg;
- in geval van afvoergenererende buien altijd een deel van het bodemprofiel verzadigd met water is:
  - het waterverzadigde deel van de bodem wordt altijd boven in het profiel aangetroffen;
  - de dikte van deze met water verzadigde laag kan varieren per locatie en regenbui;
  - in het algemeen kan gesteld worden dat bij afvoergenererende buien de dikte van de waterverzadigde laag in de zomer geringer is dan in de winter;
  - in geval van een korte regenbui met een hoge intensiteit op een sterk uitgedroogd profiel kan de met water verzadigde laag enkele millimeters tot een centimeter dik zijn (extreme zomer situatie), terwijl in het omgekeerde geval van zeer langdurige regenval op een al nat profiel deze laag dikker kan zijn dan één meter (extreme winter situatie);
  - de dikte van de waterverzadigde laag bij een afvoergenererende regenbui wordt zodoende in sterke mate bepaald door de antecedente regenval (intiële vochtgehalte van het profiel) en de buikarakteristiek zelf.

6.3 Metingen op (sub)stroomgebiedsniveau

Met betrekking tot de afvoermetingen op (sub-) en stroomgebiedsniveau kan geconcludeerd worden dat:

- het mechanisme dat leidt tot het optreden van waterafvoer en bodemerosie in de zomer en winter aanzienlijk van elkaar verschilt. De *intiële vochtgehaltes* in het bodemprofiel worden bepaald door antecendente weersomstandigheden (neerslag, temperatuur, wind etc.) en door de drainage van het bodemprofiel die afhangt van de opbouw van het bodemprofiel. In de *winterperiode* kan de laatstgenoemde faktor voor enorme verschillen in afvoergedrag tussen verschillende (sub)stroomgebieden zorgen. Een bodemprofiel dat slecht gedraineerd wordt zal na een natte periode bij vrijwel iedere neerslaggebeurtenis weer 'vollopen' waardoor afvoer optreedt (zgn. verzadigingsoverlandflow). Als deze situatie zich voordoet over een groot oppervlak binnen een stroomgebied kunnen winterbuien voor heel hoge piekafvoeren zorgen. Een goed gedraineerd bodemprofiel heeft vaak nog voldoende bergingscapaciteit om de meeste winterbuien te verwerken zonder dat er afvoer optreedt. In de *zomerperiode* is de vochtbergingscapaciteit in het bodemprofiel doorgaans veel groter dan in de winter. Daardoor wordt de afvoer in de zomer vooral bepaald door de neerslagintensiteit, de gewasontwikkeling en de condities van het bodemoppervlak;
- landgebruik een sterk differentierende factor is voor een groot aantal belangrijke variabelen die in het afvoer- en erosieproces in Zuid-Limburg een rol spelen. De verschillen in variabelen tussen verschillende bodems zijn aanzienlijk kleiner of kunnen niet statistisch aangetoond worden: de löss blijkt vrij uniform te zijn;
- de aggregaatstabiliteit en de schuifweerstand van de bodem aanzienlijk hoger zijn op grasland en in boomgaarden dan op akkerland, zodat gesteld kan worden dat

grasland en boomgaarden, naast de toch al hogere bedekkingsgraad van de vegetatie, een betere bescherming tegen erosie bieden;

- gedurende de twee meetjaren de afvoerhoeveelheden in de winterperiode het grootst geweest zijn;
- de neerslaghoeveelheden gedurende een regenbui vooral in de zomer lokaal sterk kunnen variëren. Vooral hevige buien in de zomer zijn zeer lokaal. Het is daarom de vraag, of de gebiedsreductiefactor, voor het stroomgebied Etzenrade (hoofdstuk 8), volgens de bestaande literatuur op 90% berekend, zelfs voor deze relatief kleine stroomgebieden (2 km^2) niet lager dan deze 90% moet zijn;
- de gewasontwikkeling van invloed lijkt te zijn op de afvoer in de zomer en in de winter. In de zomerperiode is erg weinig afvoer gemeten tijdens maximale gewasbedekking (laat in het groeiseizoen). In de winter is de gewasbedekking van de wintergewassen meestal te klein om van invloed te zijn. Echter, bij hoge gewasbedekking zoals bij raaigras dat direct na de wintertarweoogst is ingezaaid, wordt ook de winterafvoer beperkt;
- in de hoofdstroomgebieden Catsop, St. Gillisstraat en Etzenrade de afvoerpercentages respectievelijk 7-10%, 17-22% en 3-18% zijn. In de zomer zijn deze percentages in de afgelopen periode, met buien met herhalingstijden tot 5 jaar, tussen de 2 en de 8% in de drie gebieden;
- de grotere afvoerpercentages van de winterbuien in St. Gillisstraat waarschijnlijk veroorzaakt worden door verzadigingsoverlandflow. Een groot initieel vochtgehalte van de bodem en een geringe gewasbedekking hebben in de winter veelal een grote afvoer tot gevolg;
- indien er krijt op geringe diepte aanwezig is, zoals in het stroomgebied St. Gillisstraat, er aanzienlijk sneller verzadigings overland flow gegenereerd wordt;
- in het algemeen de sedimentgehaltes hoog zijn in het voorjaar, bij een relatief geringe hoeveelheid afvoer: er is sprake van een geringe compactie door recente bodembewerking en nauwelijks korstvorming op de akkers, naast een hoge kinetische energie van de bui en een lage bedekkingsgraad van het gewas, waardoor er veel spaterosie optreedt. Afname treedt op naarmate het groeiseizoen vordert, door een toenemende compactie, korstvorming en bedekkingsgraad. Meteen na de inzaai in het voorjaar en in de winter bij grote afvoergebeurtenissen zijn de grootste sedimentgehaltes waargenomen;
- in de winter bij grote afvoergebeurtenissen hoge sedimentconcentraties zijn gemeten. De totale hoeveelheid bodemverlies kan, in gebieden waar veel afvoer optreedt, erg groot zijn;
- de sedimentconcentraties die gemeten zijn in de substroomgebieden een grotere spreiding aan waarden te zien geven dan die van de hoofdstroomgebieden;
- sedimentafvoer uit substroomgebied 1 St. Gillisstraat, waarin zich de boomgaard bevindt, verwaarloosbaar laag is door de aanwezige grasbedekking.
- in de zomer de invloed van verslemping en korstvorming in de loop van het groeiseizoen wordt door de toenemende gewasbedekking.

6.4 Metingen naar effecten teeltsystemen en groenstroken

Met betrekking tot de metingen naar de effecten van verschillende teeltsystemen op de mate van water- en sedimentafvoer kan gesteld worden dat:

- beïnvloeding van de waterafvoer door middel van alternatieve teeltmethoden niet eenvoudig is. De meeste reductie kan worden gerealiseerd door het uitvoeren van de gangbare voorjaarsbewerkingen en het opbrengen van stro na de inzaai van het hoofdgewas. Andere methoden als directzaai en mulchzaai hebben weinig of geen invloed op de hoeveelheid waterafvoer op proefveldschaal. Op langere hellingen werd bij directzaai wel een duidelijke afvoerreductie geconstateerd;
- het opbrengen van stro een hoge bedekkingsgraad geeft en, mede door de reductie van de waterafvoer, het minste bodemverlies. Ook directzaai in een bodembedekker (eventueel m.b.v. een zaairijenfrees) reduceert het bodemverlies in sterke mate;
- in de winter de afvoer sterk gereduceerd wordt door het optrekken van de akker. Dit verhoogt de infiltratie, verwijderd de wielsporen en zorgt voor een hoge bodemruwheid waardoor veel water aan het oppervlak geborgen wordt. Toch kan ook van opgetrokken percelen veel water afstromen indien de condities voor verzadigingsoverlandflow zich voordoen;
- bodemverlies gedurende de winterperiode aanzienlijk beperkt wordt door een najaarsbewerking zoals een stoppelbewerking met de vastetandcultivator. Inzaai van een bodembedekker veroorzaakt een geringe extra reductie van de erosie;
- groenstroken de stroomsnelheid van het water in sterke mate beïnvloeden indien het water als een dunne laag door het gras stroomt en het gras niet geheel onder water komt te staan. Hierdoor kan verwacht worden dat in stroomgebieden groenstroken piekafvoeren kunnen afvlakken;
- groenstroken de sedimentlast van afstromend water kunnen verminderen en daarmee erosieproblemen beperken. Invang van sediment neemt toe met toenemende strookbreedte. Echter, de eerste meters van de strook vangen reeds de bulk van het sediment in. Met grote strookbreedtes wordt maar weinig 'winst' geboekt. Onderdompeling van het gras moet worden voorkomen. Bij een geconcentreerde waterstroom is de invangeffectiviteit van de groenstrook slechter. De kans hierop neemt toe met toenemende lengte van de akkerhellingdelen tussen de stroken. Geconcentreerde stroming kan worden voorkomen door de afstand tussen de groenstroken te beperken en door ze zo goed mogelijk de hoogtelijnen te laten volgen;
- oud extensief gebruikt grasland in principe te verkiezen is boven jong intensief gebruikt grasland waar het de sedimentfilterende werking betreft;
- de belangrijkste functie van een grasbaan in de dalbodem het voorkomen van 'ephemeral gully'-vorming is: de vorming van brede ondiepe geulen. Bij stroming door grasbanen is sprake van geconcentreerde stroming. De waterdieptes en -snelheden zullen normaal gesproken hoger zijn dan die bij stroming door filterstroken. De filterwerking van grasbanen zal daarom beduidend kleiner zijn dan in geval van 'thin uniform flow' door een filterstrook.

7 Het LISEM-model

7.1 Inleiding

Ten behoeve van de extrapolatie van de meetgegevens naar andere stroomgebieden in Zuid-Limburg is een model ontwikkeld, dat zowel de effecten van het huidige landgebruik als de effecten van diverse scenario's kan doorrekenen. Het ontwikkelde model heeft de naam 'LISEM' gekregen: het LImburg Soil Erosion Model, het limburgse bodemerosie model.

Het LISEM-model is een fysisch-deterministisch ('physically-based') model: het simuleert de werkelijkheid aan de hand van de fysische wetmatigheden. Het model berekent wat er tijdens en direct na een regenbui gebeurt in een stroomgebied ten aanzien van (oppervlakkige) afstroming, bodemerosie en sedimentatie in de dalbodems. Tevens beschrijft het de beweging van water in de bovenste zone van de bodem. Afhankelijk van de te simuleren bui en de initiële vochtcondities kan deze dikte variëren van 120 cm tot elke gewenste diepte (500 of 1000 cm), afhankelijk van het feit of het volledige profiel verzadigd kan worden.

Het LISEM-model is een gedistribueerd ('distributed') model omdat de verschillende elementen waarin het landschap is verdeeld (pixels of gridcellen) invloed op elkaar kunnen uitoefenen, waarbij bijvoorbeeld de uitvoer van de ene cel de invoer van een lager gelegen cel is. Een perceel boven aan een helling kan zodoende een perceel onderaan de helling of in de dalbodem beïnvloeden. Elke gridcel wordt beschreven door unieke variabelen (zie Hoofdstuk 7.2.3), initiële condities en een hoeveelheid neerslag. Gegeven de initiële drukhoogte (een maat voor het bodemvochtgehalte) wordt, per gridcel en per tijdstap, de grootte van de oppervlakkige afstroming en de hoeveelheid erosie berekend. Vervolgens wordt per tijdstap water en sediment langs de helling verplaatst naar lager gelegen gridcellen.

Het LISEM-model is een gebeurtenis-georiënteerd ('event-based') model omdat het ontwikkeld is om een enkele regenbui te simuleren. Omdat er geen rekening wordt gehouden met verdamping en de laterale stroming van water door de bodem tussen regenbuien in, is het niet zinvol om langere perioden, zoals een maand of een jaar, met deze model-versie door te rekenen. Bovendien zou de benodigde rekentijd in de orde van weken komen.

Het LISEM-model simuleert stroomgebieden, die worden onderverdeeld in gridcellen. Alle gridcellen wateren zodoende af op hetzelfde uitstroompunt. Omdat Het LISEM-model een stroomgebied opdeelt in gridcellen wordt er rekening gehouden worden met ruimtelijke verschillen zoals reliëf, bodemtypen, landgebruik, en overige kenmerken van een landschap zoals bebouwde gebieden, verharde oppervlakten en wegen en graften. Het LISEM-model heeft de mogelijkheid om binnen een stroomgebied verschillende substroomgebieden te onderscheiden en ook hiervoor de resultaten van de berekeningen weg te schrijven in aparte bestanden. De variabelen die nodig zijn voor het model worden verderop beschreven.

Het LISEM-model is een van de eerste voorbeelden van een fysisch-deterministisch model dat in zijn geheel is geïntegreerd in een GIS (Geografisch Informatie Systeem). Geïntegreerd betekent dat er geen conversie programma's nodig zijn tussen het model en het GIS en dat het model in zijn geheel bestaat uit commando's die in het GIS gebruikt worden. PC-Raster, ontwikkeld aan de Universiteit Utrecht, is het GIS-pakket dat hiervoor wordt gebruikt. Benodigde delen van dit GIS worden met het LISEM-model meegeleverd. Deze integratie in een GIS vergemakkelijkt verdere toepassing in grote stroomgebieden, de gebruikersvriendelijkheid en het mogelijke gebruik van remote sensing data van vliegtuigen of satellieten. De belangrijkste redenen om een GIS te gebruiken zijn dat de processen van de oppervlakkige afstroming en bodemerosie ruimtelijk variëren. Andere voordelen om een GIS te gebruiken zijn:

— de mogelijkheid om snel aangepaste kaarten te produceren met een ander landgebruik of andere conserveringsmaatregelen om alternatieve scenario's te simuleren;
— de mogelijkheid om zeer grote stroomgebieden met veel gridcellen te gebruiken, zodat het stroomgebied gedetailleerder gesimuleerd kan worden;
— de faciliteit om resultaten ook als kaarten af te beelden.

Door de grote hoeveelheid cellen wordt de totale hoeveelheid data zo groot dat invoer met de hand in aparte files een tijdrovende bezigheid wordt. Niet alle benodigde invoergegevens voor het LISEM-model zijn echter even gemakkelijk beschikbaar. Omdat een gedetailleerde monstername niet mogelijk is zijn er een beperkt aantal puntwaarnemingen van de bodem, het landgebruik, etc., verzameld gedurende het erosienormeringsprojekt. Hoe de variabelen zijn verzameld en statistisch geanalyseerd is vermeld in hoofdstuk 3. Geostatistische interpolatietechnieken, geïntegreerd met het GIS, kunnen vervolgens gebruikt worden om kaarten te maken van deze puntwaarnemingen. In andere gevallen worden per bodemtype of type landgebruik gemiddelde waarden bepaald en toegekend aan een perceel of bodemklasse. Op deze manier worden een serie kaarten gemaakt die de variatie van verschillende variabelen in ruimte en tijd weergeven.

Het belangrijkste voordeel van het integreren van modellen in een GIS is dat de 'source code' van het model neerkomt op één GIS commando per proces (zoals interceptie, spaterosie e.d.). De huidige versie van het LISEM-model is hierdoor minder dan 200 regels (exclusief commentaren). Wel moet het GIS beschikken over een aantal commando's om dit soort modellen te kunnen bouwen (Van Deursen & Kwadijk, 1990). Hiervoor bevat PC-Raster commando's om te vragen naar en het rapporteren van tijd-series, commando's voor het verplaatsen van water zoals de kinematische golf-vergelijkingen (Chow et al., 1988) en iteratie-methoden om impliciete vergelijkingen op te lossen zoals de Newton methode.

Het LISEM-model is geschreven in een prototype GIS modelleringstaal, ontwikkeld aan de Universiteit Utrecht. Het gebruik van deze taal maakt het makkelijker om nieuwe relaties aan het model toe te voegen of bestaande relaties te veranderen. Het model gebruikt hiervoor in veel gevallen een commando (CALC) dat een grote hoeveelheid verschillende operaties op kaarten kan uitvoeren (Van Deursen & Wesseling, 1992).

Het LISEM-model berekent per tijdstap en per gridcel verschillende processen. Allereerst kan de 'binnenkomende' hoeveelheid neerslag door de vegetatie of het gewas afgevangen worden in de vorm van interceptie. Vervolgens wordt de infiltratie per gridcel bepaald aan de hand van het bodemwater-submodel, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen tractorsporen, verharde wegen en het resterende oppervlak. Het overgebleven water kan in micro-depressies op het bodemoppervlak achterblijven of kan al over de oppervlakte gaan afstromen. Vervolgens worden spaterosie, erosie door stromend water en/of depositie berekend per gridcel. Uiteindelijk worden de berekende hoeveelheden over de oppervlakte stromend water en de hoeveelheden sediment verplaatst naar een lager gelegen gridcel, afhankelijk van de stroomsnelheid van het water. In een volgende tijdstap begint de berekening weer opnieuw, waarbij de hoeveelheid water en sediment uit bovenliggende gridcellen of niet getransporteerd water en sediment uit de vorige tijdstap wordt meegenomen.

Na de laatste tijdstap worden er een aantal kaarten gemaakt die de ruimtelijke patronen van bodemerosie, sedimentatie en de hoeveelheid over de oppervlakte afstromend water op bepaalde tijdstippen gedurende de bui in een stroomgebied beschrijven. Met behulp van het PC-Raster GIS kunnen bijvoorbeeld erosie-kaarten van verschillende buien of van verschillende scenario's vergeleken worden door ze van elkaar af te trekken en het verschil te berekenen. Hierdoor worden kaarten geproduceerd die aangeven hoe de bodemerosie of sedimentatie kunnen zijn beïnvloed door bepaalde maatregelen binnen een stroomgebied.

7.2 De invoer van het LISEM-model

Het LISEM-modelgebruikt een aantal invoerbestanden en kaarten om berekeningen uit te kunnen voeren. Deze invoerbestanden worden hieronder beschreven.

7.2.1 Neerslag file

Data van verschillende regenmeters kunnen ingevoerd worden in het neerslag-bestand. Via een in te voeren kaart wordt de juiste regenmeter aan de juiste gridcel gekoppeld. Aan de hand van deze kaart produceert het model voor elke tijdstap gedurende de simulatie van een bui een kaart met de ruimtelijke verdeling van de neerslag-intensiteit. Hierdoor houdt het model rekening met de ruimtelijke en temporele variabiliteit van neerslag.

7.2.2 Tabellen voor het bodemwater-model

Ingebouwd in het LISEM-model is een aangepaste versie van het SWATRE bodemwater-model. Dit model simuleert de verticale beweging van water door de bodem (Feddes et al., 1978; Belmans et al., 1983). Binnen de drie stroomgebieden zijn verschillende bodemprofielen gedefinieerd. De verticale beweging van water wordt gesimuleerd door het opdelen van het bodemprofiel in een door de gebruiker

gedefinieerd aantal laagjes (in de huidige LISEM-versie 14). Voor elke karakteristieke bodemhorizont worden de gemeten relaties tussen het vochtgehalte van de bodem en de doorlatendheid van de bodem gelezen uit de voor de horizont specifieke tabellen, gebaseerd op metingen in de drie stroomgebieden (zie hoofdstuk 3.3.3).

7.2.3 Kaarten van de relevante topografische, bodem en landgebruiksvariabelen

Om met het LISEM-model te kunnen simuleren zijn drie groepen kaarten in GIS-formaat nodig:

1) een groep kaarten die de stroomgebiedsmorfologie beschrijven:
   - — een kaart die het hoofdstroomgebied definieert;
   - — een kaart die aangeeft welke regenmeters van toepassing zijn;
   - — een kaart met de locaties van het hoofduitstroompunt en de uitstroompunten van de substroomgebieden;
   - — een kaart met de hellingklassen;
   - — een kaart met de hellingshoek van de belangrijkste afvoerkanalen ('channels');
   - — een kaart met de stromingsrichting van de oppervlakkige afstroming;
   - — een kaart met de Manning's n voor oppervlakkige afstroming;
   - — een kaart met de Manning's n voor 'channels';
   - — twee kaarten voor de morfologie van de 'channels' (breedte en vorm);
   - — een kaart met de locatie en breedte van wegen;
   - — een kaart met de locatie en de breedte van tractorsporen;
2) een groep kaarten, nodig voor het bodemwater submodel:
   - — een kaart met de bodemprofieltypen, verwijzend naar de tabellen die de doorlatendheid van de bodem beschrijven;
   - — eenzelfde kaart met het bodemprofieltype onder tractorsporen;
   - — kaarten met de initiële drukhoogten voor elk bodemlaagje.
3) een groep kaarten met bodem en landgebruiksvariabelen:
   - — een kaart met de 'Leaf Area Index' (LAI);
   - — een kaart met de bedekkingsgraad van de vegetatie of gewas;
   - — een kaart met de gewashoogte;
   - — een kaart met de bodemruwheid;
   - — een kaart met de aggregaatstabiliteit van de bodem;
   - — een kaart met de schuifweerstand van de bodem;
   - — een kaart met de schuifweerstand van de 'channels'.

De beschrijving van een (stroom-)gebied door middel van gridcellen, zoals binnen het LISEM-model, is een benadering van het werkelijke landschap. Het zogenaamde DTM (Digitale Terrein Model) van een gebied kan gemaakt worden door het digitaliseren van hoogtelijnen op een topografische kaart. Vervolgens kunnen door middel van het GIS de hoogte, de hellingshoek en de expositie van elke gridcel berekend worden. Door middel van het programma WATERSHED, een onderdeel van het PC-Raster GIS kan dan vervolgens de stromingsrichting van elke gridcel berekend worden, c.q. op welke manier het water van een willekeurig punt in het stroomgebied naar het uitstroompunt stroomt. Dit stromingspatroon wordt de Local Drain Direction (LDD) genoemd.

De meeste kaarten met bodem- en landgebruiksvariabelen kunnen door middel van eenvoudige GIS-commando's gemaakt worden. De meeste variabelen hebben een relatie met het landgebruiks- of het bodemtype. Door (her-)codering van deze kaarten (RECODE) kunnen van de basiskaarten (de landgebruikskaart en de bodemkaart) de juiste invoer-kaarten gemaakt worden. Voor de te volgen procedure wordt verwezen naar de handleiding van het LISEM-model (De Roo et al., 1994).

Vanuit de basis-kaarten (bodemtype en landgebruik) kunnen de meeste bodem- en gewasvariabelen aangemaakt worden. In de handleiding van het LISEM-model zijn hiervoor standaardtabellen voor Zuid-Limburg opgenomen. Een voorbeeld hiervan zijn de bodemprofieltypen die gebruikt worden voor het berekenen van de stroming van water door de bodem (tabel 7.1):

Tabel 7.1 Profieltypen voor verschillend landgebruik gedurende het jaar

Mnd	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
AWt	13	13	13	6	6	6	11	11	11	11	13	1
AB	14	14	14	1	7	7	7	7	7	14	14	14
AM	15	15	15	15	1	9	9	12	12	12	15	15
AA	14	14	14	1	7	7	7	7	7	14	14	14

Wordt een bui gesimuleerd in de maand juni dan geldt er als bodemprofieltype voor alle maïsakkers het profieltype 9. De landgebruikskaart van juni wordt dan omgezet in een profieltypenkaart van maïsakkers in de maand juni door alle maïsakkers in de landgebruikskaart (met b.v. de GIS-code 7) om te zetten in een profieltypenkaart met voor maïsakkers de waarde 9. Vervolgens wijst deze profieltypenkaart dan naar een tabel die de relaties geeft tussen de doorlatendheid van de bodem en het vochtgehalte van de bodem (tabel 7.2).

Tabel 7.2 k-θ-h-relaties voor maïsakkers in de zomer

θ (-)	h (cm)	k (cm/d)
0,01	-1,72E+14	0,00E+00
0,02	-6,87E+04	2,14E-12
0,03	-1,87E+04	4,64E-10
.....	.....	.....
.....	.....	.....
0,29	-4,28E+01	1,06E+00
0,30	-2,60E+01	1,66E+00
0,31	0,00E+00	1,69E+01

Voor alle variabelen is er onderzocht wat voor een waarde ze per maand, per landgebruik en per bodemtype bezitten. Zo kunnen er variabelen zijn die bijvoorbeeld in de maand augustus met als landgebruik wintertarwe en als bodemtype löss een andere waarde hebben dan een gedeelte van een akker in augustus met als landgebruik wintertarwe en als bodemtype kleefaarde. Voor de indeling van de verschillende variabelen in tabellen is steeds gekeken of de waarden van deze variabele significant verschillend waren voor een bepaald landgebruik of een bepaald bodemtype (hoofdstuk 3).

7.2.4 Het commandobestand

Als men een simulatie opstart met het LISEM-model wordt de gebruiker gevraagd naar 1) de naam van het stroomgebied, 2) de te simuleren neerslaggebeurtenis, 3) de verlangde vorm en namen voor de uitvoer. De gebruiker kan deze informatie specificeren in een commandobestand. Dit bestand stelt de gebruiker in staat om het volgende aan te geven:

- — een stroomgebied, door het specificeren van de directory die de topografische-, bodem- en landgebruikskaarten bevatten;
- — de bodemwater modelparameters, door het specificeren van de directory van de bodemwater tabellen;
- — de neerslaggebeurtenis;
- — de begin- en eindtijd van de simulatie;
- — de simulatie-tijdstap en de minimum tijdstap voor het bodemwater-submodel;
- — een precisiefactor voor het bodemwater model;
- — een aantal parameters en coëfficiënten, die in de erosie- en transportcapaciteit-formules zitten, zoals de valsnelheid van de bodemdeeltjes en een 'splash delivery ratio';
- — de namen van de uitvoer-bestanden zoals:
  - — bestanden die de waarden voor de afvoerverlooplijnen geven;
  - — kaarten van de hoeveelheid over de oppervlakte afstromend water op verschillende tijdstippen;
  - — een kaart die de hoeveelheid bodemerosie beschrijft;
  - — een resultaatbestand met totaalresultaten.

7.3 Een voorbeeld van de code binnen het LISEM-model

Een groot gedeelte van het modelleren binnen het LISEM-model bestaat uit een aantal vergelijkingen die het 'CALC' commando gebruiken. Dit commando kan een grote hoeveelheid verschillende operaties op kaarten uitvoeren, waaronder rekenkundige en boolean berekeningen (Van Deursen & Wesseling, 1992). Als bijvoorbeeld de maximale hoeveelheid neerslag die nodig is om een micro-depressie op het bodemoppervlak te vullen (RETRAIN) berekend moet worden, wordt de volgende vergelijking, afgeleid van ONSTAD (1984), gebruikt:

```
calc (" RETRAIN=max(0.329*RR + 0.073*sqr(RR) - 0.018*RR*(GRAD),0.0)");
```

waarbij:

RETRAIN	= de maximale hoeveelheid neerslag die nodig is om een micro-depressie te vullen (cm)
RR	= de random roughness van het bodemoppervlak (cm)
GRAD	= de helling-gradiënt (%)
sqr(x)	= de wortel van vergelijking x
max (x,y)	= bepaal het maximum van vergelijkingen x en y

Omdat RETRAIN niet kleiner kan zijn dan 0 is de minimum waarde van de RETRAIN altijd 0. Als het eerste gedeelte van de vergelijking kleiner is dan 0 dan wordt het tweede gedeelte van de vergelijking gepakt. De variabele RETRAIN wordt dan de waarde 0 gegeven.

Deze vergelijkingen kunnen gemakkelijk veranderd worden, als er nieuwe en/of betere vergelijkingen bekend worden of als er nieuwe processen binnen het model gesimuleerd moeten worden.

7.4 De gesimuleerde processen per gridcel

7.4.1 Inleiding

In figuur 7.1 is een stroomschema van het LISEM-model weergegeven. De processen die per gridcel berekend worden, zijn:
— de neerslag
— het afvangen van water door een bladerdek (interceptie)
— de infiltratie en vertikale beweging van water door de bodem
— de oppervlakte berging in micro-depressies
— de hoeveelheid over de oppervlakte afstromend water
— de stroming van water door afvoerkanalen ('channels')
— het losmaken van bodemdeeltjes door neerslag en doorval van neerslag
— het losmaken van bodemdeeltjes door oppervlakkige afstroming
— transport capaciteit van oppervlakkige afstroming
— de invloed van traktorsporen
— de invloed van (smalle) verharde wegen
— de invloed van groenstroken en grasbanen
— de invloed van korstvorming op de hydrologische en bodemerosie processen

Nadat de neerslag begint, wordt, per gridcel, een gedeelte van deze neerslag weggevangen door het bladerdek van de vegetatie, tot op een bepaald tijdstip de de maximale hoeveelheid water die een bladoppervlak kan afvangen (de maximale interceptie) is bereikt. Naast het afvangen van water door een bladerdek bereikt er ook neerslag rechtstreeks de bodem en kan de neerslag via het bladerdek de bodem bereiken. Samen met het over de oppervlakte afstromend water van hoger gelegen gridcellen dragen deze componenten bij tot de hoeveelheid water die beschikbaar is voor infiltratie. Hierna infiltreert er een gedeelte van dit water. De hoeveelheid water die overblijft na infiltratie begint op het oppervlak te accumuleren in micro-depressies. Als een bepaalde (vooraf vast te stellen) hoeveelheid aan depressies is gevuld begint het water over de oppervlakte af te stromen. De snelheid van deze oppervlakkige afstroming wordt berekend door gebruik te maken van de parameters: Manning's n en de hellingshoek. De richting van het over de oppervlakte afstromend water is afhankelijk van de expositie van een bepaalde gridcel. Als de neerslag stopt gaat het infiltratie-proces door tot er geen water in de depressies meer is.

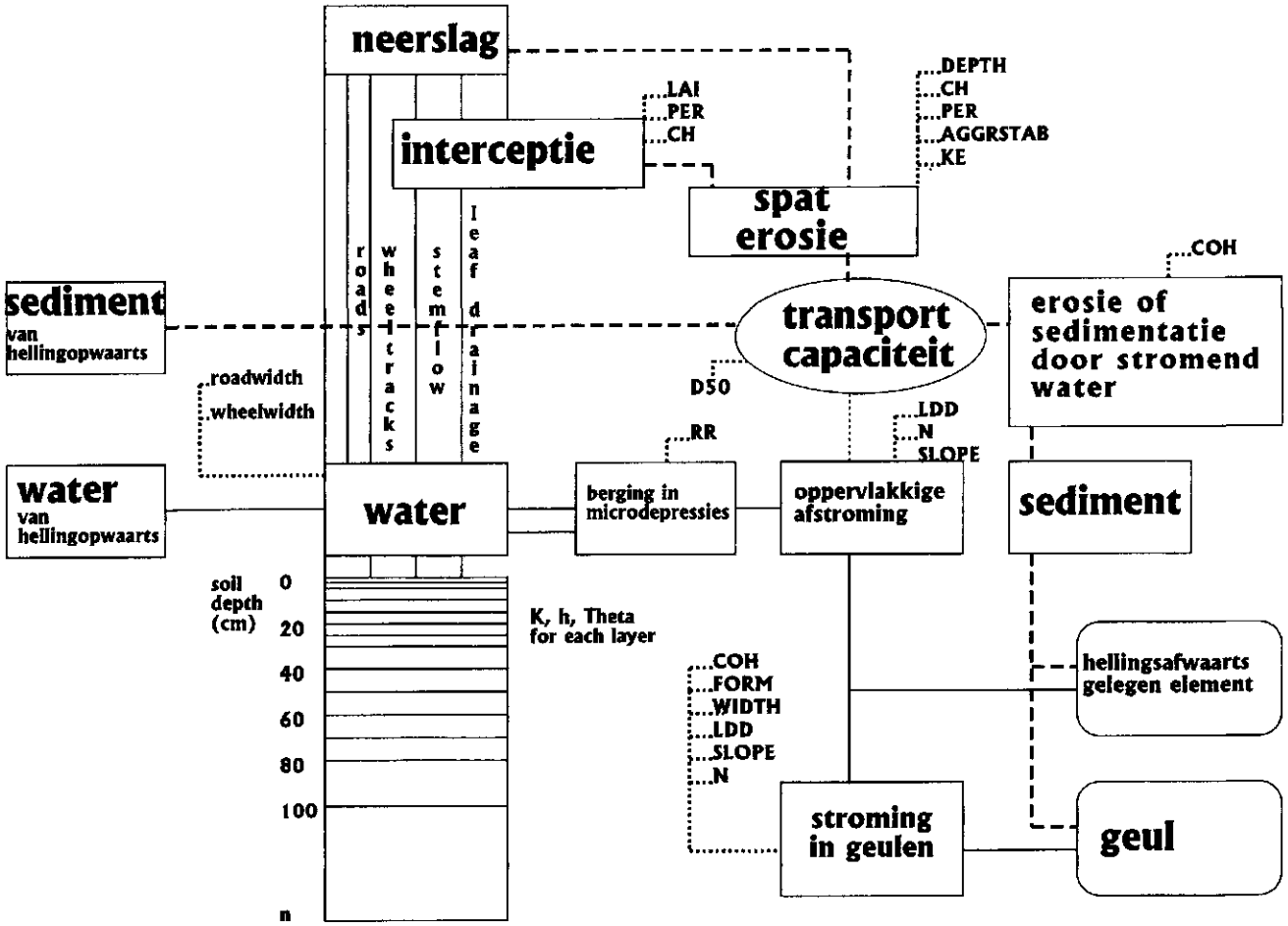


Fig. 7.1 Stroomschema van het LISEM-model.

Het losmaken van bodemdeeltjes en transport van bodemdeeltjes kunnen veroorzaakt worden door druppelinslag of over de oppervlakte afstromend water. Of een bodemdeeltje zich verplaatst hangt af van het sedimentgehalte van het over de oppervlakte afstromend water en van de capaciteit voor sediment transport van het over de oppervlakte afstromend water. Op deze manier wordt per tijdstap berekend hoeveel water en sediment er in de volgende tijdstap verplaatst kan worden naar een volgende gridcel. Op deze manier worden water en sediment naar steeds lager gelegen delen binnen een stroomgebied getransporteerd. Sommige verharde wegen en de gridcellen onder in de dalen worden gedefinieerd als stroomgeulen ('channels'). Voor deze stroomgeulen gelden andere variabelen die gedefinieerd worden in aparte kaarten. Alle stroomgeulen zijn zo geconstrueerd dat als water en sediment deze gridcellen bereiken ze altijd naar het uitstroompunt van het stroomgebied getransporteerd worden. In deze stroomgeulen kan naast sedimentatie ook erosie optreden, in tegenstelling tot het model ANSWERS, dat dit niet kon.

7.4.2 Neerslag

Data van meerdere regenmeters kunnen ingevoerd worden in een invoerbestand. Er wordt een kaart gebruikt om voor elke gridcel aan te geven welke regenmeter gebruikt moet worden. Voor elke tijdstap gedurende de simulatie van een regenbui berekent het model op deze manier een kaart van de ruimtelijke verdeling van de neerslag intensiteit. Het model houdt op deze manier rekening met de natuurlijke ruimtelijke en temporele variabiliteit van de neerslag. In de toekomst zouden er op radar data gebaseerde neerslag intensiteits-patronen die in ruimte en tijd variëren gebruikt kunnen worden. Op deze manier kunnen buien gesimuleerd worden die over een stroomgebied heen trekken.

7.4.3 Interceptie

Het afvangen van neerslag door gewassen en/of natuurlijke vegetatie wordt in twee stappen gesimuleerd. Allereerst wordt de maximale hoeveelheid water die een bladerdek kan afvangen gedurende een bui berekend met behulp van de vergelijking ontwikkeld door Von Hoyningen-Huene (1981):

$$SMAX = 0.935 + 0.498*LAI - 0.00575*LAI^2 \qquad (7.1)$$

waarbij: SMAX = maximale bergingscapaciteit (mm);
LAI = leaf area index (-).

De cumulatieve hoeveelheid water die een bladerdek kan afvangen gedurende een bui wordt gesimuleerd door een vergelijking ontwikkeld door Aston (1979) en Merriam (1960):

$$CINT = SMAX * \left[1 - e^{-(1-p)*\frac{PCUM}{SMAX}}\right] \qquad (7.2)$$

waarbij: CINT = cumulatieve interceptie (mm);

PCUM = cumulatieve neerslag (mm);
p = correctie factor, is gelijk aan (1-0.046*LAI).

Bij deze vergelijking kan al water de bodem bereiken voordat het bladerdek de maximale hoeveelheid water heeft afgevangen. De faktor k, gelijk aan (1-p), is geïntroduceerd door Aston (1979) om het effect in te bouwen dat het afvangen van water trager wordt naar mate de vegetatie dichter wordt. Tegelijkertijd houdt deze factor rekening met het effect dat alleen een gedeelte van de cumulatieve neerslag die op de vegetatie valt (PCUM*PER, waarbij PER = gewasbedekking) kan bijdragen aan de hoeveelheid water die een bladerdek kan afvangen. Uit de vergelijking die de cumulatieve hoeveelheid water dat een bladerdek kan afvangen wordt de snelheid van het afvangen van water berekend.

7.4.4 Berekening van waterstroming door de bodem

Infiltratie en bodemwater-transport worden gesimuleerd met het SWATRE model (Feddes et al., 1978; Belmans et al., 1983), dat geïntegreerd is in het LISEM-model. SWATRE is een dynamisch watertransport model waarbij voor het berekenen van de waterbeweging in de bodem een differentiaal vergelijking opgelost wordt die is samengesteld uit een flux- en een massabalansvergelijking: de wet van Darcy en de continuiteitsvergelijking (Richard's vergelijking):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \tag{7.3}$$

waarbij: K(h) = de doorlatendheid van de bodem ($cm.s^{-1}$);
h = de drukhoogte (matrix potentiaal) (cm);
Θ = het volumetrisch bodemvochtgehalte ($m^3.m^{-3}$);
z = de zwaartekrachts potentiaal of hoogte boven een referentievlak (cm);
t = tijd (s).

Gebruik makend van de bodemwater capaciteit $C(h)=d\Theta(h)/dh$ (de hellingshoek van de pF-curve) wordt een vergelijking bepaald die de stroming van water door de onverzadigde zone kan berekenen:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \tag{7.4}$$

waarbij: C(h) = differentiële vochtcapaciteit ($C(h)=\delta\theta/\delta h$) ($cm^{-1}$)

Formule 7.3 wordt in SWATRE numeriek opgelost volgens de eindige differentiemethode waarbij plaats en tijd gediscretiseerd worden. Hierbij wordt een impliciet rekenschema toegepast waarbij gebruik gemaakt wordt van expliciete linearisatie (Belmans et al., 1983).

Binnen SWATRE wordt hiervoor het Thomas-algoritme gebruikt (Remson et al., 1971). Het bodemprofiel wordt daartoe opgedeeld in discrete compartimenten. Het bodemprofiel zelf kan onderverdeeld zijn in lagen/horizonten (die uit een of meerdere

compartimenten bestaan) met verschillende fysische eigenschappen (doorlatendheid, waterretentiecurve). Als randvoorwaarde aan de bovenkant van het systeem wordt de neerslag per tijdseenheid opgegeven. In totaal zijn er 14 compartimenten gedeifinieerd bestaande uit drie verschillende bodemhorizonten (van 0 tot 250 cm). Het model berekent voor ieder compartiment per tijdsstap het vochtgehalte, drukhoogte en de in/uitgaande fluxen. De hoeveelheid voor runoff beschikbaar water wordt berekend door per tijdstap de wateraanvoer (netto neerslag) te verminderen met de netto infiltratie. Het submodel rekent met een variabele tijdstap afhankelijk van de veranderingen in drukhoogten.

In figuur 7.2 is het stroomschema weergegeven van de in het LISEM-model gebruikte module ter beschrijving van de waterbeweging in de bodem. In figuur 7.3 zijn de benamingen van de verschillende subroutines aangegeven.

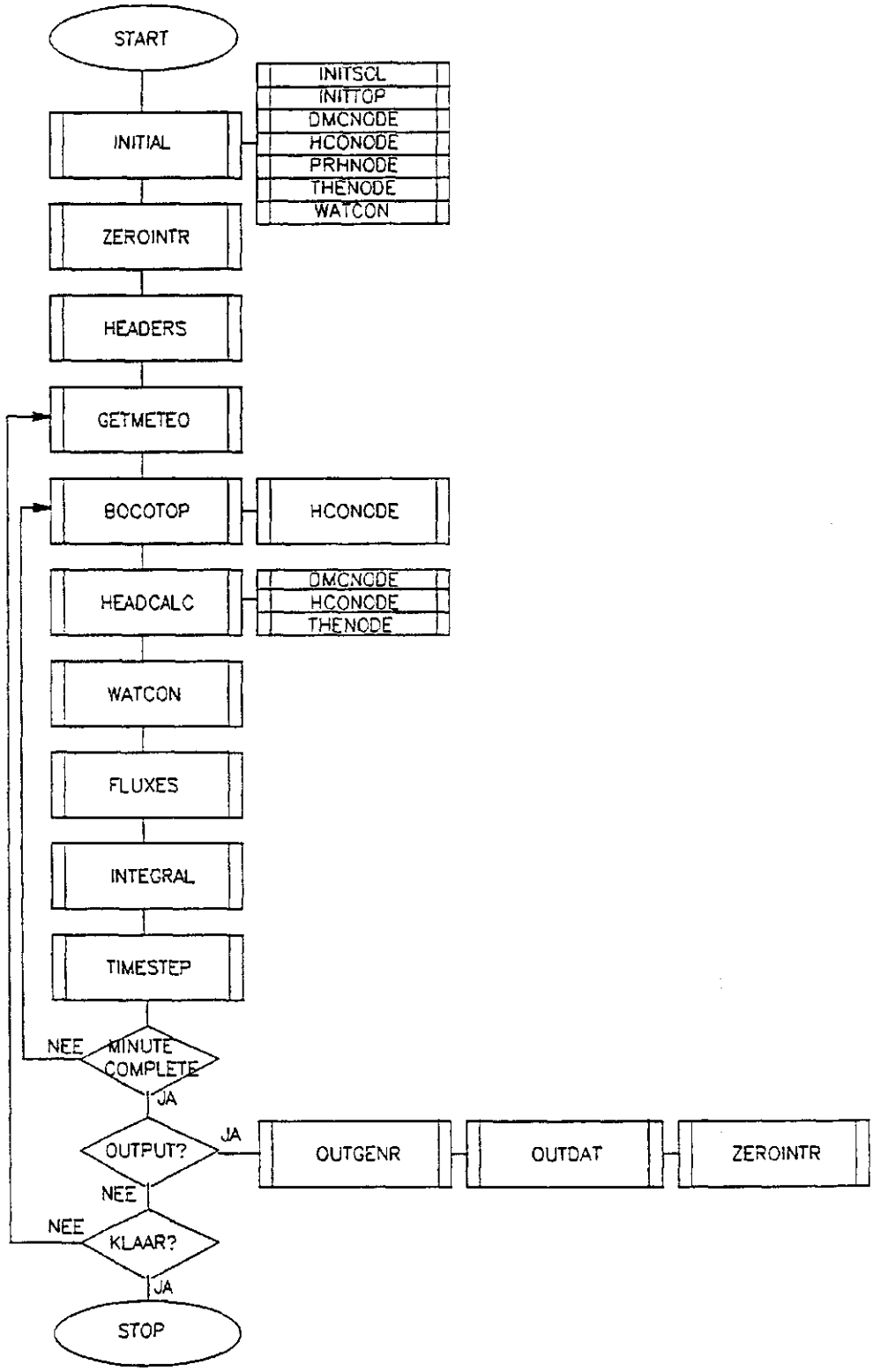


Fig. 7.2. Aanroep van subroutines in water transport module van het LISEM-model

BOCOTOP	Randvoorwaarde aan maaiveld (infiltratie)
DMCNODE	Berekent differentiële vocht cap.
FLUXES	Berekent fluxen
GETMETEO	Leest neerslag
HEADCALC	Berekent drukhoogte, vochtinhoud en doorlatendheid voor volgende tijdstap
HEADERS	Maakt tabelopschriften
HCONODE	Berekent doorlatendheid
INITIAL	Leest initiële waarden
INITSOL	Leest bodemfysische gegevens
INITTOP	Leest en schrijft randvoorwaarden aan maaiveld
INTEGRAL	Bereknt runoff en cumuleert
OUTGENER	Produceert waterbalans
OUTDAT	Produceert drukhoogte- en vochtprofielen
PRHNODE	Berekent drukhoogte's
THENODE	Berekent vochtgehalte's
TIMESTEP	Berekent tijdstap
WATCON	Berekent hoeveelheid vocht in het profiel
ZEROINTR	Initialiseert totalen
CHECKDBL	Invoercontrole voor double precision getallen
CHECKINT	Invoercontrole voor gehele getallen
CHECKREA	Invoercontrole voor real getallen
ERRREAD	Verzorgt de foutmelding tgv leesfouten
FINDADR	Zet de pointer van de inputfile op de juiste positie
OPENFILE	Opent files

Fig. 7.3. Korte beschrijving van de subroutines in de water transport module van het LISEM-model

De Mualem/Van Genuchten vergelijkingen (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) worden gebruikt om de pF-curves en de doorlatendheid van de bodem in de onverzadigde zone te berekenen die nodig zijn om bovenstaande formule op te lossen. Dit leidt tot verschillende parameters, de 'van Genuchten parameters', die vergelijkingen beschrijven die de relatie weergeven tussen het vochtgehalte en de doorlatendheid van de bodem.

7.4.5 Berging in micro-depressies

De berging in micro depressies wordt gesimuleerd door een serie vergelijkingen ontwikkeld door Onstad (1984) en Linden et al. (1988). De variabele bodemruwheid wordt gebruikt als een maat voor het microreliëf. De berging van water op het oppervlak van de bodem in depressies wordt gesimuleerd door (Onstad, 1984):

$$RETMAX = 0.112*RR + 0.031*RR^2 - 0.012*RR*S \qquad (7.5)$$

waarbij: RETMAX = maximum depressie berging (cm);
RR = bodemruwheid (cm);
S = hellingshoek (%).

Het neerslagoverschot is de hoeveelheid water afkomstig van neerslag en van hoger gelegen gridcellen minus het afvangen van neerslag door vegetatie en de hoeveelheid

infiltratie. Dit neerslagoverschot, benodigd om alle depressies te vullen, wordt berekend met behulp van de vergelijking (Onstad, 1984):

$$RETRAIN = 0.329*RR + 0.073*RR^2 - 0.018*RR*S \qquad (7.6)$$

waarbij: RETRAIN = het neerslagoverschot nodig om de depressies te vullen (cm)

Moore & Larson (1979) identificeerden drie mogelijke perioden gedurende een neerslag gebeurtenis:
a) Micro-reliëf berging treedt op, geen oppervlakkige afstroming;
b) Gedeeltelijk micro-reliëf berging en gedeeltelijk oppervlakkige afstroming;
c) Alleen oppervlakkige afstroming.

Om de overgang van situatie a naar situatie b te bepalen zijn de data van Onstad (1984) geanalyseerd. Uit deze analyse is de volgende vergelijking ontwikkeld, die het begintijdstip van het over de oppervlakte afstromend water simuleert:

$$DETSTART = RETMAX*[0.0527*RR - 0.0049*S] \qquad (7.7)$$

waarbij: DETSTART = neerslag overschot dat nodig is om oppervlakkige afstroming te veroorzaken (cm)

Gedurende periode a) wordt alle neerslagoverschot geborgen in depressies. Vanaf het punt DETSTART tot punt RETMAX treden zowel over de oppervlakte afstromend water als berging in depressies op. Na het 'punt' RETMAX wordt alle neerslag-overschot oppervlakkige afstroming. Op elk tijdstip kan de actuele berging in de depressies (RET) berekend worden.

Gebruikmakend van dezelfde data kan de maximum hoeveelheid van het oppervlak dat met water is bedekt, berekend worden (Onstad, 1984):

$$FWAMAX = 0.152*RR - 0.008*RR^2 - 0.008*RR*S \qquad (7.8)$$

waarbij: FWAMAX = de maximum hoeveelheid van het oppervlak bedekt met water (-).

De actuele hoeveelheid van het oppervlak dat bedekt is met water wordt berekend met behulp van een relatie gebaseerd op het werk van Moore & Larson (1979) en Onstad (1984):

$$FWA = FWAMAX*\left[\frac{RET}{RETMAX}\right]^{0.6} \qquad (7.9)$$

waarbij: FWA = de actuele hoeveelheid van het oppervlak bedekt met water (-).

Gebaseerd op de bevindingen van Linden et al. (1980) worden sommige depressies tijdelijk geïsoleerd en dragen niet bij tot oppervlakkige afstroming. Uit hun data is bepaald dat als de berging (RET) minder dan 75% van de RETMAX is, 20% van

de depressies geïsoleerd is. Als RET tussen de 75% en 100% van RETMAX is dan geldt de volgende relatie:

$$FWAISO = 0.20*FWA*\left[1-\frac{\frac{RET}{RETMAX}-0.75}{0.25}\right] \qquad (7.10)$$

waarbij: FWAISO = de hoeveelheid geïsoleerde depressies (-).

7.4.6 Oppervlakkige afstroming en stroming door een stroomgeul

Voor het bepalen van de hoeveelheid water die per tijdstap van een gridcel naar de volgende kan worden getransporteerd wordt een oplossing van de zogenaamde 'kinematic wave'- vergelijkingen gebruikt samen met de 'Manning's' vergelijking. Het is aangetoond dat de 'kinematic wave'-vergelijkingen een bevredigende benadering zijn van oppervlakkige afstroming en stroming in geulen (Woolhiser & Liggett, 1967; Morris & Woolhiser, 1980). Numerieke oplossingen van de 'kinematic wave' vergelijkingen kunnen gevonden worden in Chow et al. (1988) en Moore & Foster (1990). De 'Manning' vergelijking geeft de snelheid waarmee het water van de ene gridcel naar de volgende stroomt aan de hand van de dikte van de waterlaag in deze gridcel. Hieruit is de hoeveelheid water die van de ene gridcel naar de volgende verplaatst wordt, te bepalen. De Manning vergelijking, voor een dunne waterlaag, ziet er als volgt uit:

$$V = \frac{R^{2/3}*S^{1/2}}{n} \qquad (7.11)$$

waarbij: V = de stroomsnelheid in het water ($m.s^{-1}$);
R = de hydraulische straal (= dikte van de waterlaag bij oppervlakkige afstroming met geringe diepte) (m);
S = de hellingshoek van de gridcel (%);
n = de Manning's n (ruwheidsfactor van het bodemoppervlak).

7.4.7 Het losmaken van bodemdeeltjes door spaterosie

Spaterosie wordt gesimuleerd als een functie van de aggregaatstabiliteit, de kinetische energie van de neerslag en de diepte van de waterlaag op de bodem. Dit submodel is gecalibreerd aan de hand van veldexperimenten verricht door de Universiteit van Amsterdam (Cremers et al., in prep). De totale kinetische energie is de som van de energie door het direct bereiken van neerslag van de bodem en de energie door drainage van bladeren. De volgende vergelijking wordt gebruikt:

$$DETR = \left[\frac{2.07}{AGGRSTAB}*KE*\exp^{-1.48*DEPTH}+2.20\right]*(P-I)*\frac{(dx)^2}{dt} \qquad (7.12)$$

waarbij: DETR = het losmaken van bodemdeeltjes door spaterosie in een gridcel ter grootte van dx ($g.s^{-1}$);

AGGRSTAB	=	bodem aggregaatstabiliteit (de mediaan van het aantal druppels);
KE	=	de kinetische energie van de neerslag ($J.m^{-2}$);
DEPTH	=	de diepte van de waterlaag op de bodem (mm);
P	=	neerslag (mm);
I	=	interceptie (mm);
dx	=	grootte van een gridcel (m);
dt	=	tijdstap (s).

Indien er geen aggregaatstabiliteit bepaald kan worden en deze niet wordt ingevoerd, wordt automatisch de Torvane schuifweerstand van de bodem, die eveneens in de stroomgebieden is bepaald, gebruikt in een soortgelijke formule.

7.4.8 Transportcapaciteit

De transportcapaciteit van het over de oppervlakte afstromend water wordt gemodelleerd als een functie van de 'unit stream power' (Govers, 1990). Voor lössbodems wordt de volgende vergelijking, geldig voor bodems met een mediane diameter van 50 µm, gebruikt:

$$TC = 0.063 * [S * V - 0.4]^{0.56} \tag{7.13}$$

waarbij: TC = transportcapaciteit van de oppervlakkige afstroming ($cm^3.cm^{-3}$);
S = helling gradiënt ($m.m^{-1}$);
V = gemiddelde snelheid van het stromend water ($cm.s^{-1}$).

7.4.9 Rill en interrill erosie

Het losmaken van bodemdeeltjes en depositie van bodemdeeltjes door stromend water wordt gesimuleerd door gebruik te maken van vergelijkingen afkomstig van het EUROSEM model (Morgan et al., 1992). Als de transportcapaciteit van het water kleiner is dan de hoeveelheid aanwezig sediment, afkomstig van spaterosie, van hoger op de helling gelegen gridcellen en/of van voorafgaande tijdstappen, treedt er depositie op met de volgende snelheid (Morgan et al., 1992):

$$DEP = w * v_s * [TC - C] \tag{7.14}$$

waarbij: DEP = depositie snelheid ($kg.m^{-3}$);
w = breedte van de stroming (m);
v_s = sedimentatie snelheid van de bodemdeeltjes ($m.s^{-1}$);
TC = transport capaciteit ($kg.m^{-3}$);
C = sediment concentratie van de stroming ($kg.m^{-3}$).

Als de transportcapaciteit van het water groter wordt dan de sedimentconcentratie in de stroming, maakt het stromende water bodemdeeltjes los. Dit wordt berekend aan de hand van de volgende formule:

$$DF = y*w*v_s*[TC-C] \tag{7.15}$$

waarbij: DF = snelheid van het losmaken van bodemdeeltjes ($kg.m^{-3}$);
y = coëfficiënt van efficiëntie (-).

De coëfficiënt van efficiëntie in bovenstaande vergelijking wordt berekend door de volgende vergelijking (Morgan et al., 1992; Rauws & Govers, 1988):

$$y = \frac{u_{gmin}}{u_{gcrit}} = \frac{1}{0.89+0.56*COH} \tag{7.16}$$

waarbij: u_{gmin} = minimum waarde benodigd voor de kritische schuifspanningssnelheid van de korrels ($cm.s^{-1}$);
u_{gcrit} = kritische schuifspanningssnelheid voor het ontstaan van rills ($cm.s^{-1}$);
COH = cohesie van de bodem verzadigd met water (kPa).

7.4.10 Tractorsporen, verharde wegen en korstvorming

In het LISEM-model kunnen tractorsporen gesimuleerd worden. Opgegeven wordt een kaart de totale breedte van de tractorsporen binnen een gridcel. Het model berekent vervolgens de infiltratie in twee gedeelten: in het gedeelte zonder sporen, en in het tractorspoor met behulp van een apart opgeven bodemfysische tabel. Er vindt in het model geen interceptie plaats op wielsporen, wel splash en flow erosie dan wel sedimentatie.

Verhard oppervlak, zoals wegen, wordt op soortgelijke wijze gesimuleerd: er dient een kaart met de wegbreedte in m. opgegeven te worden. De infiltratie op wegen wordt op 0 gesteld. Er vindt geen interceptie en splash detachment op wegen plaats. Wel kan reeds eerder op het verharde oppervlak afgezet slib weer worden meegenomen.

Korstvorming kan worden meegenomen door, als een oppervlak geheel verkorst is, een andere bodemfysische tabel te gebruiken. Deze tabellen zijn wel beschikbaar maar niet gebruikt, omdat een oppervlak nooit in z'n geheel verkorst is. Dit zou tot een onderschatting van de geproduceerde oppervlakkige afstroming kunnen leiden. Tests met de verschillende tabellen hebben uitgewezen dat de verschillen niet spectaculair groot zijn. Korstvorming tijdens een bui wordt niet gesimuleerd.

7.4.11 Groenstroken en grasbanen

In het LISEM-model kunnen de effecten van groenstroken en grasbanen op de water- en sedimentafvoer gesimuleerd worden. Opgegeven wordt een kaart de totale breedte van de groenstroken of grasbanen binnen een gridcel. Het model rekent vervolgens een nieuwe snelheid van de oppervlakkige afstroming uit op de grasbanen en groenstroken, gebruikmakend van de Manning's n van grasland. Er is aangenomen dat infiltratie onder groenstroken gelijk is aan infiltratie onder bouwland. Voor brede grasbanen kan eventueel de waarde van grasland gekozen worden. Er vindt geen splash en flow detachment plaats op grasbanen en groenstroken. Wel kan er depositie plaatsvinden.

7.5 De uitvoer van het LISEM-model

De resultaten bestanden van het LISEM-model bestaan uit: (1) een tekstbestand met totaal resultaten (totale neerslag, totale afvoer, piekafvoer, totaal bodemverlies, etc.), (2) een ASCII databestand wat gebruikt kan worden om afvoerverlooplijnen en sedimentverlooplijnen te plotten, (3) GIS-kaarten van bodemerosie en depositie, zoals veroorzaakt door de bui en (4) GIS-kaarten van de hoeveelheid over de oppervlakte afstromend water op gewenste tijdstippen gedurende de bui. Als voorbeeld is een bui gesimuleerd in het stroomgebied Catsop. De resultaatkaarten van deze bui zijn weergegeven in figuur 7.4 t/m 7.7. Het tekstbestand met totaal resultaten van deze bui ziet er als volgt uit (tabel 7.5).

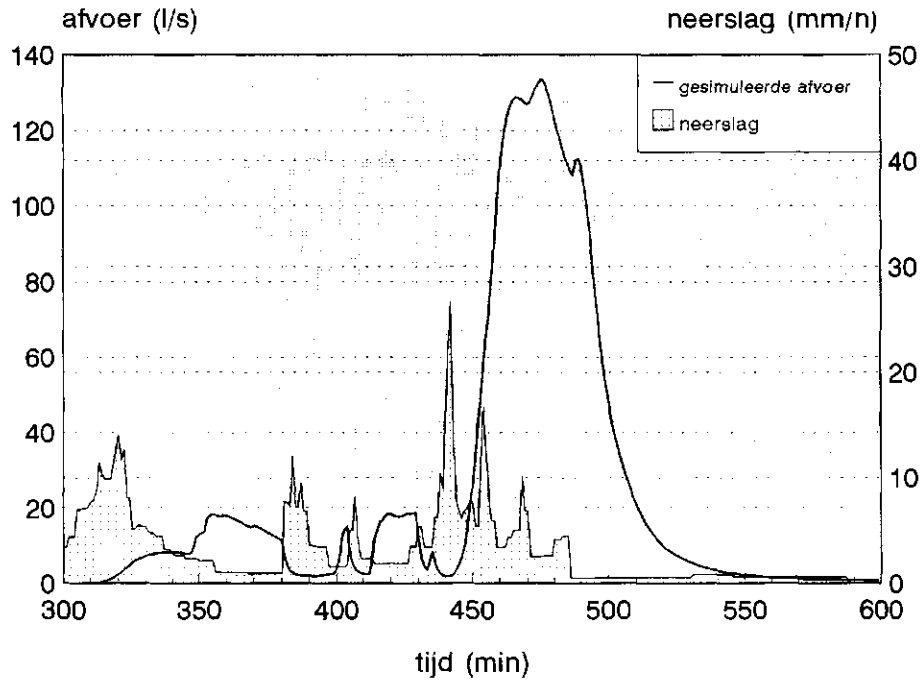


Fig. 7.4 Een voorbeeld van de afvoerverlooplijnen van een bui-simulatie

Tabel 7.5 Voorbeeld van een standaard LISEM uitvoer tekstbestand

catchment area (ha)	:	41,560
total rainfall (mm)	:	20,000
total discharge (mm)	:	0,4982
discharge percentage	:	0,0249
total discharge (m3)	:	207,09
peak discharge (l/s)	:	156,46
peak time (min)	:	24,083
total soil loss (ton)	:	0,6682
average soil loss (kg/ha)	:	16,078

7.6 Gevoeligheidsanalyse

Er is een gevoeligheidsanalyse van het LISEM-model uitgevoerd. Hiervoor is het stroomgebied Catsop gekozen vanwege de grootte en de eerder verrichte gevoeligheidsanalyse met het model ANSWERS.

De gevoeligheid van het model is geanalyseerd met een afwijking van +20% en -20% per variabele. We zien dat het model, voor de simulatie van de hoeveelheid runoff, het meest gevoelig (ca. 50%) is voor de waarde van de doorlatendheid van de bodem. De variabelen **drukhoogte, vochtgehalte, Manning's n, random roughness, LAI en hellingshoek** zijn ook gevoelig (tussen 5 en 20%). De overige variabelen zijn niet gevoelig voor de hoeveel afvoer die het model produceert. Indien deze gevoeligheden afgezet worden tegen de daadwerkelijk in het veld optredende variaties van variabelen, dan zijn vooral de **drukhoogte** en **Manning's n** zeer belangrijke gevoelige variabelen. Omdat de in het veld optredende variaties, ofwel de meetfout groter kan zijn dan 20%, is de reëele gevoeligheid hiervan het grootst. Random roughness en hellingshoek zijn in het algemeen redelijk nauwkeurig te meten.

Voor de hoeveelheid sediment die het model genereert zijn de variabelen **Manning's n en random roughness** relatief gevoelig (meer dan 10%). Aangezien random roughness redelijk nauwkeurig te meten is en de doorlatendheid van de bodem variaties vertoont die veel groter zijn dan 20%, zijn ook hier de **doorlatendheid** en **Manning's n** weer de gevoeligste variabelen. De variabelen kritische schuifspanning, 'settling velocity' en de parameters c1 en d1 uit de vergelijking van Govers zijn ook gevoelige factoren in het sediment-gedeelte van het LISEM-model.

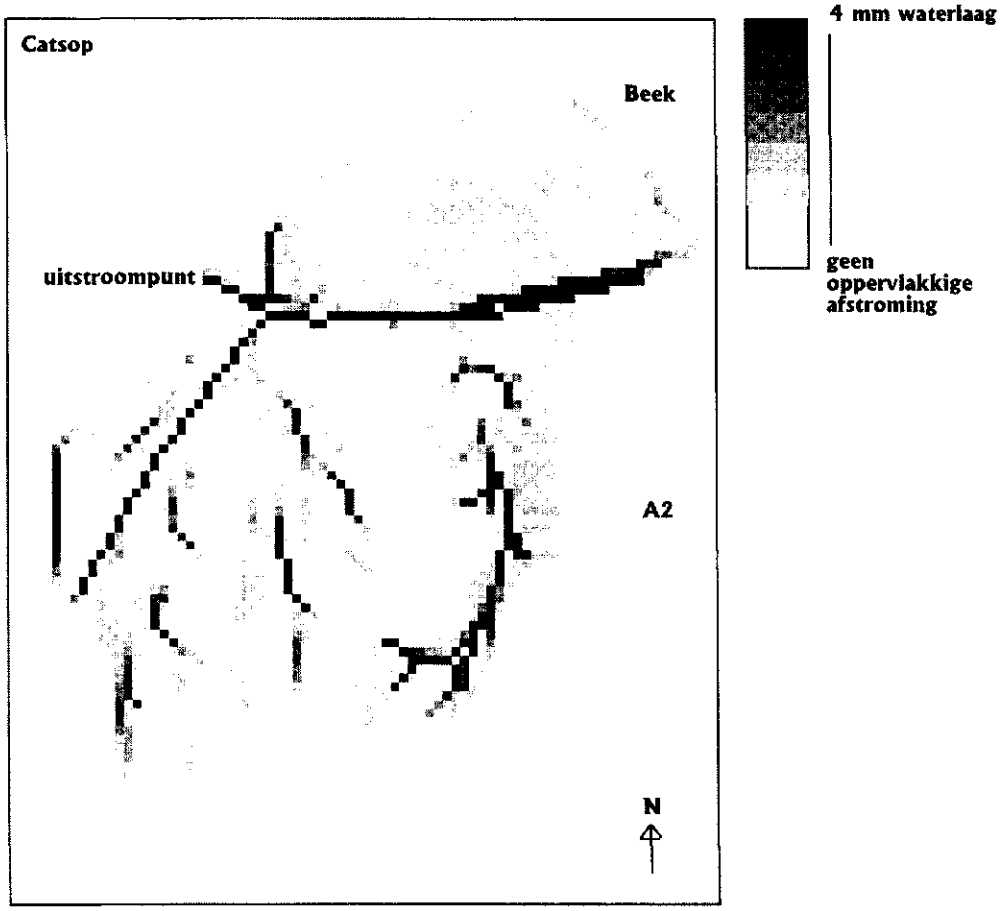


Fig. 7.5 Een voorbeeld van een kaart van over de oppervlakte afstromend water

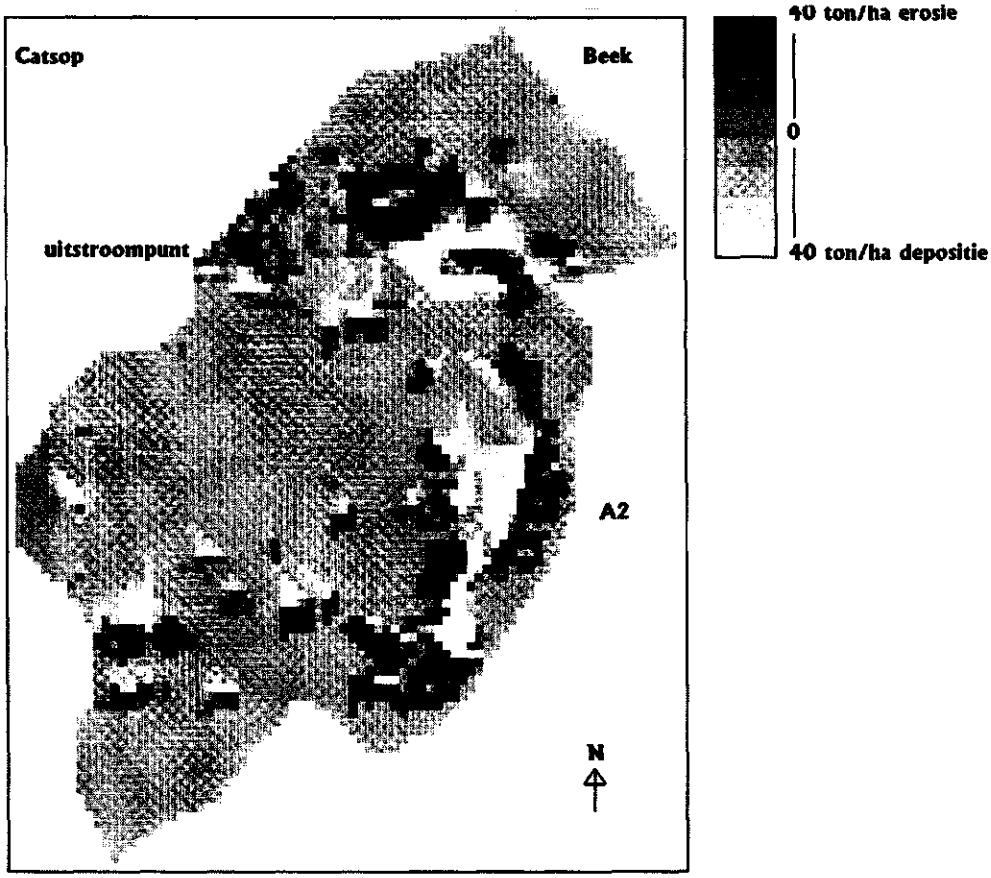


Fig. 7.6 Een voorbeeld van een bodemverlieskaart.

Tabel 7.6 Gevoeligheidsanalyse van het LISEM-model in het stroomgebied Catsop. Weergegeven zijn de afwijkingen van de totale afvoer, de piekafvoer en het gemiddelde bodemverlies, als gevolg van variaties van plus of min 20% van een model-variabele

Code	tot.afv.	piek afv.	gem.bod.	afw.(%)	afw.(%)	afw.(%)	variabele
LISEM	197,77	170,83	17,43	0	0	0	
kmin	297,25	282,75	15,71	50,30	65,51	-9,87	drltndhd
kmax	122,18	86,77	15,73	-38,22	-49,21	-9,75	
hmin	211,01	184,64	16,78	6,69	8,08	-3,73	drukhoogte
hmax	180,78	151,37	16,85	-8,59	-11,39	-3,33	
vmin	218,03	176,94	18,68	10,24	3,58	7,17	vochtgehalte
vmax	186,26	168,05	15,91	-5,82	-1,63	-8,72	
nmin	221,55	199,82	21,96	12,02	16,97	25,99	Manning's n
nmax	178,96	150,08	16,29	-9,51	-12,15	-6,54	
gradmin	178,22	147,66	16,98	-9,89	-13,56	-2,55	hellingshoek
gradmax	218,65	195,36	17,88	10,56	14,36	2,56	
rrmin	219,23	189,45	15,21	10,85	10,90	-12,74	RRoughness
rrmax	160,85	129,91	19,49	-18,67	-23,95	11,82	
laimin	211,70	186,84	17,54	7,04	9,37	0,63	lai
laimax	183,09	151,50	17,70	-7,42	-11,31	1,55	
cohmin	197,77	170,83	17,42	0	0	-0,06	cohesie
cohmax	197,77	170,83	17,43	0	0	0,00	
sucrmin	197,77	170,83	28,29	0	0	62,31	crt.usp (1)
sucrmax	197,77	170,83	15,79	0	0	-9,41	
svmin	197,77	170,83	14,39	0	0	-17,44	setl.v (2)
svmax	197,77	170,83	20,50	0	0	17,61	
c1govmin	197,77	170,83	13,83	0	0	-20,65	c1 (3)
c1govmax	197,77	170,83	21,02	0	0	20,60	
d1govmin	197,77	170,83	18,03	0	0	3,44	d1 (4)
d1govmax	197,77	170,83	17,02	0	0	-2,35	

(1) critische 'unit stream power' uit verg. 7.13 (Govers), initieel gesteld op 0.4 cm/s;
(2) vs uit formule 7.14: settling velocity van sediment in water;
(3) experimenteel bepaalde coëfficiënt uit verg. 7.13 (Govers), voor löss 0.063;
(4) experimenteel bepaalde coëfficiënt uit verg. 7.13 (Govers), voor löss 0.56;

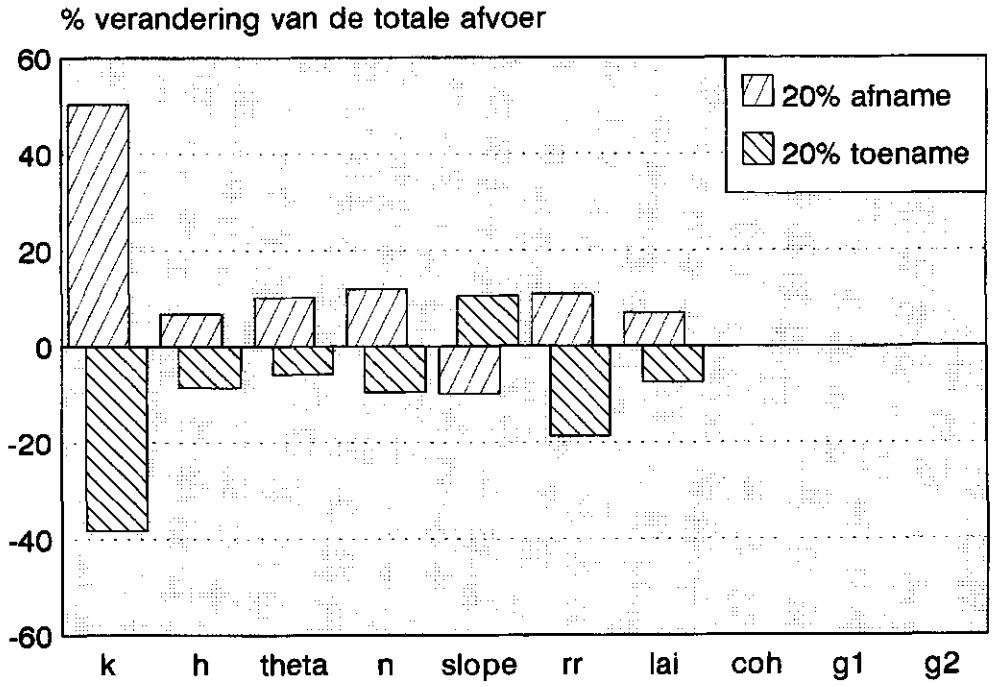


Fig. 7.7 De gevoeligheid van de gesimuleerde totale afvoer voor enkele invoervariabelen

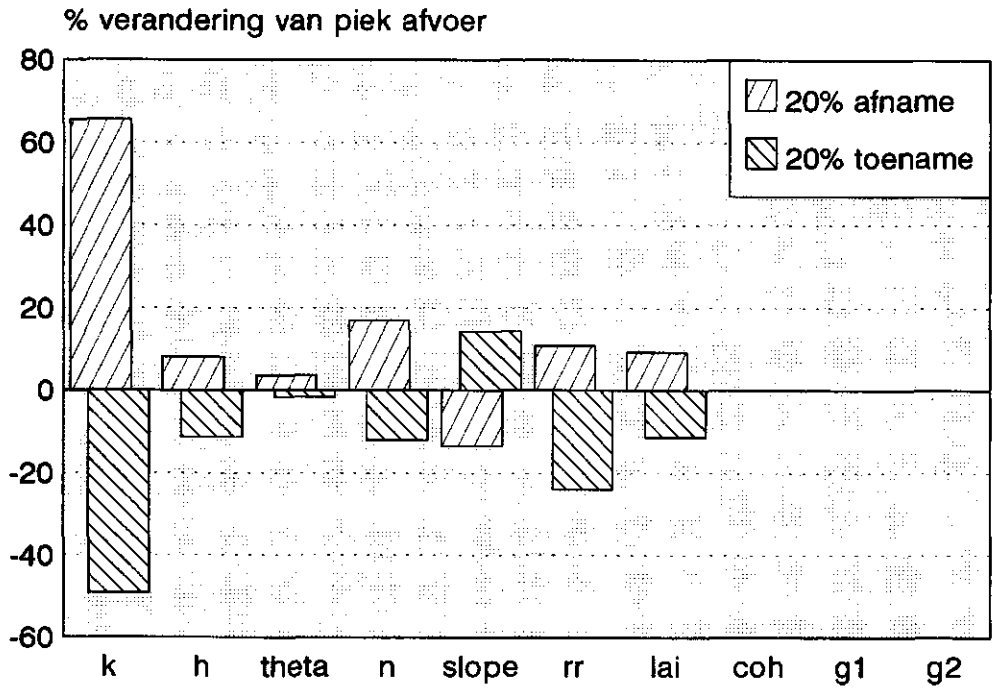


Fig. 7.8 De gevoeligheid van de gesimuleerde piekafvoer voor enkele invoervariabelen

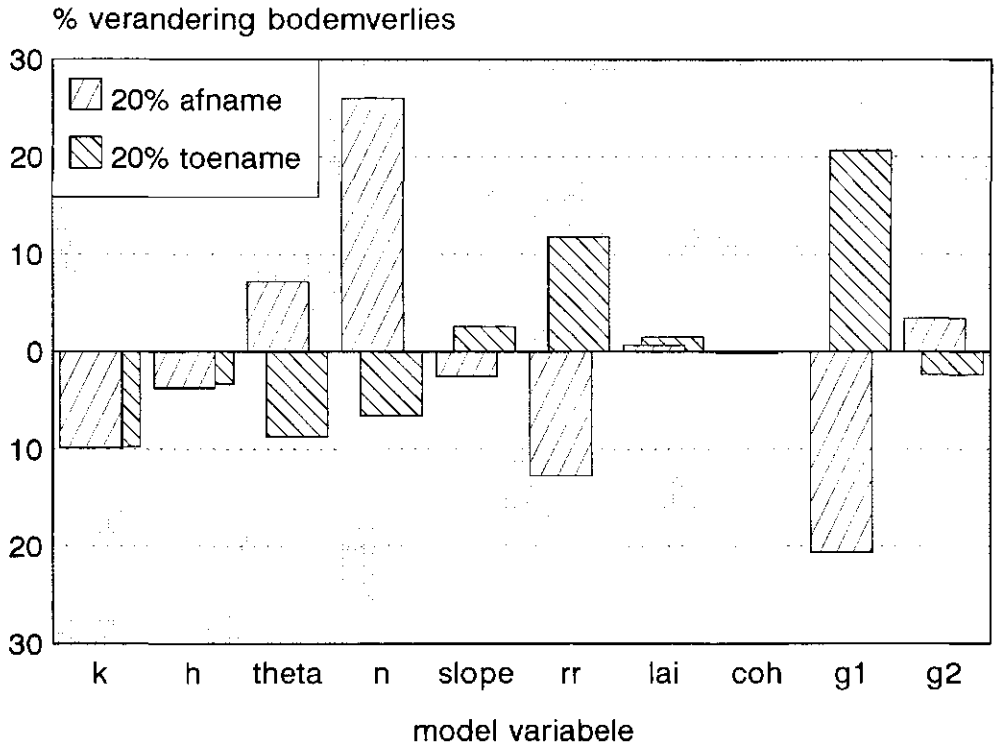


Fig. 7.9 De gevoeligheid van de uitvoer het LISEM-model voor enkele invoervariabelen met betrekking tot het bodemverlies

7.7 Conclusies

Het ontwikkelde LISEM-model is een fysisch deterministisch model dat door deze eigenschap het meest geschikt is voor gebruik in andere gebieden. Hier dient men dan wel over de relatieve grote hoeveelheid invoervariabelen te beschikken. De beschikbaarheid van voldoende invoergegevens om betrouwbare simulaties uit te voeren is een bekend probleem in de 'modellen'-wereld. Echter, zelfs na twee en half jaar intensief meten in het kader van dit projekt blijkt dat de hoeveelheid beschikbare gegevens wel toereikend, maar nog niet bijster groot is. In het lössgebied van Zuid-Limburg zijn standaardtabellen beschikbaar, zoals deze in de model-handleiding staan vermeld, om de invoergegevens voor het LISEM-model te selecteren.

Het LISEM-model is, zoals alle modellen een benadering van de werkelijkheid. Alleen de belangrijkste processen die een rol spelen, zijn nagebootst. De gebruikte vergelijkingen zijn, naast zelf ontwikkelde vergelijkingen, gebaseerd of ontleend aan zeer recent onderzoek uitgevoerd door op erosie-gebied toonaangevende instituten als de Katholieke Universiteit Leuven in België, de Universiteit van Silsoe/Cranfield in Engeland, en diverse instituten in de Verenigde Staten en Canada. Omdat slechts de belangrijke processen zijn meegenomen, is bijvoorbeeld het proces 'interflow', het lateraal door de bodem stromen van water, niet meegnomen in deze versie van

het model, omdat het, zoals aangetoond in hoofdstuk 8, op buibasis niet van meetbare invloed is.

8 Resultaten van het LISEM-model

8.1 Inleiding

Het LISEM-model is gevalideerd in drie verschillende stroomgebieden in Zuid-Limburg door het vergelijken van gemeten en gesimuleerde waterafvoer en sedimentconcentraties op de uitstroompunten van de stroomgebieden en de sub-stroomgebieden (8.3). Tevens zijn ten behoeve van de validatie van het hellinghydrologie sub-model de gemeten drukhoogten vergeleken met de gesimuleerde drukhoogten (8.2). De oppervlakkige afstromingspatronen, zoals waargenomen in het veld, zijn vergeleken met de gesimuleerde patronen. In de drie stroomgebieden zijn de volgende data beschikbaar en gebruikt:

— metingen van de afvoer en de sedimentconcentratie op de drie uitstroompunten van de stroomgebieden (zie hoofdstuk 4);
— metingen van de afvoer en de sedimentconcentratie op de zes uitstroompunten van de sub-stroomgebieden (zie hoofdstuk 4);
— metingen van de drukhoogte van de bodem op twaalf locaties en negen diepten tot en met 180 cm (zie hoofdstuk 3);
— data van neerslag simulatiestudies op de proefboerderij Wijnandsrade (zie hoofdstuk 5);
— oppervlakkige afvoer en sedimentgehalte van verschillende demonstratie locaties waar conserverings-experimenten zijn uitgevoerd (zie hoofdstuk 5).

8.2 Calibratie van het helling hydrologie model

8.2.1. Twee-dimensionale aanpak

Gemeten versus berekende vochtspanningen

Voor verscheidene (afvoergenerende) zomer- en winterbuien zijn de vochtspanningen op elk van de vier meethellingen gesimuleerd met SWMS_2D, een numeriek computermodel dat twee-dimensionale waterstroming m.b.v. de eindige elementen methode berekent (Simunek et al., 1992). In de modelberekeningen is er van uitgegaan dat de afzonderlijke horizonten isotroop zijn, dat wil zeggen dat de bodemfysische eigenschappen van het materiaal richtingsonafhankelijk zijn, i.e. per horizont is één set van pF en k-h relaties gebruikt. Naast de bodemfysische karakteristieken van de verschillende horizonten zijn de gemeten vochtspanningen vlak voor de start van een regenbui gebruikt als invoer, c.q. initiële waarden, voor het model. De gemeten regendata zijn gebruikt als tijdsafhankelijke invoer. Het geschematiseerde dwarsprofiel en het gebruikte rekengrid voor de vier hellingen zijn in figuur 8.1. weergegeven.

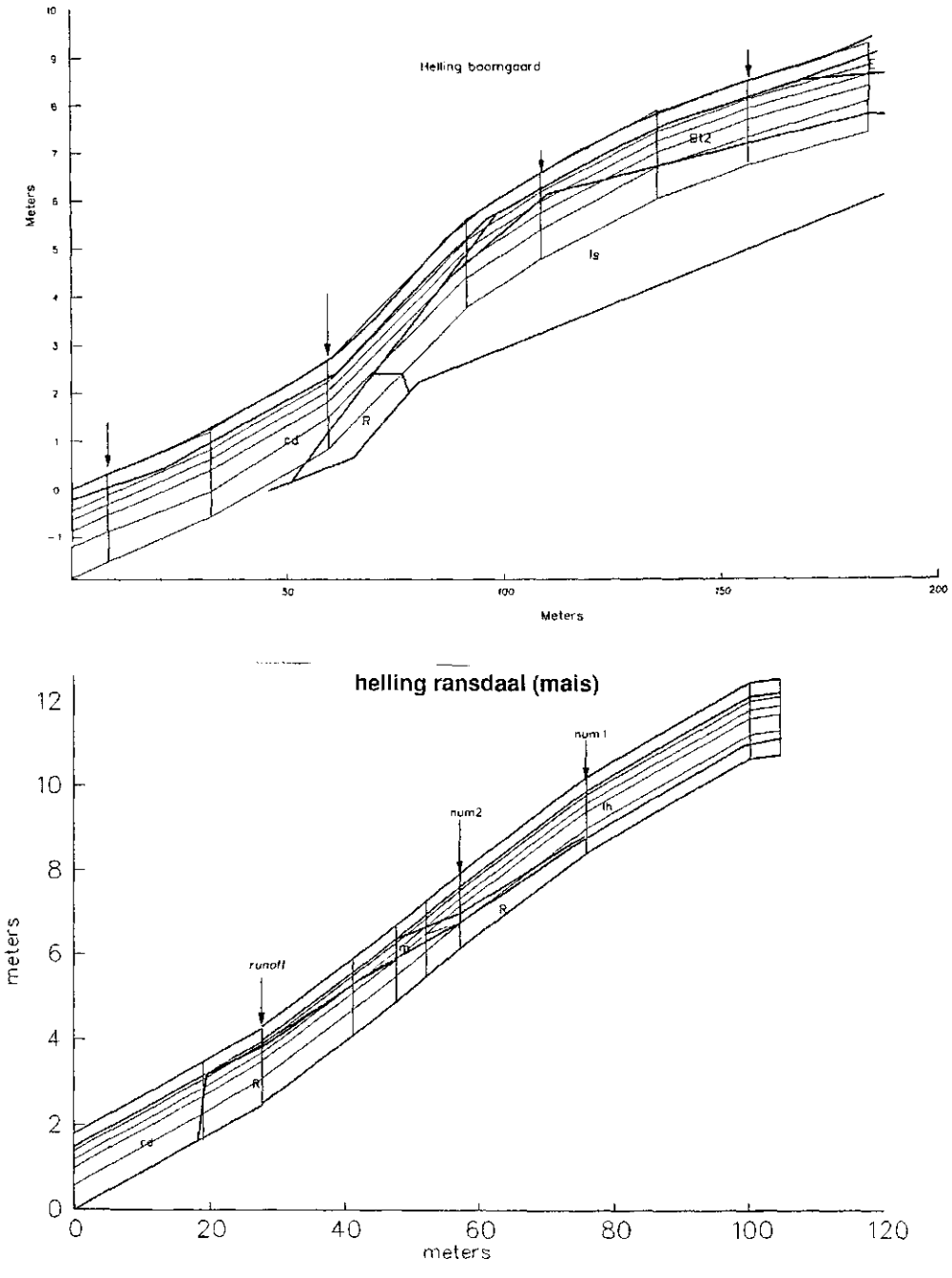
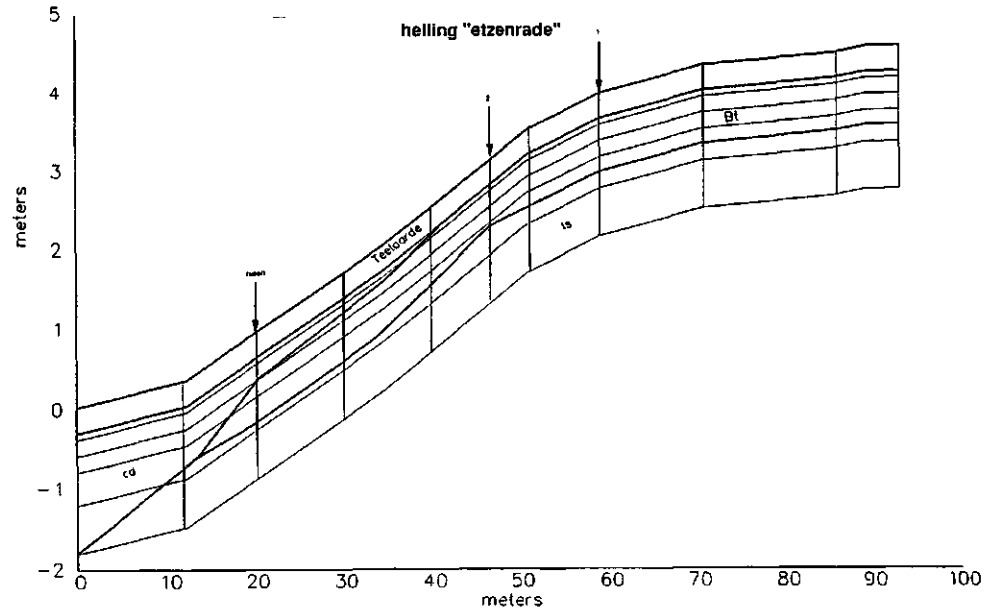
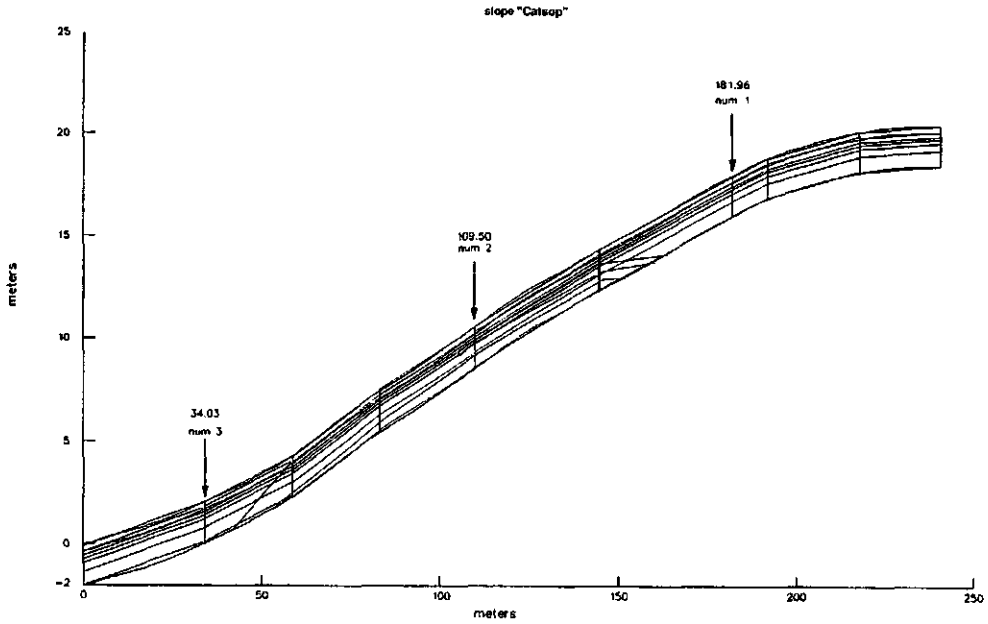


Fig. 8.1. Het geschematiseerde dwarsprofiel en het gebruikte rekengrid voor de vier hellingen: (a) helling boomgaard Ransdaal/St. Gillisstraat, (b) helling maïs Ransdaal/St. Gillisstraat, (c) helling Etzenrade, (d) helling Catsop





Resultaten van gemeten en berekende vochtspanningen voor elk van deze vier hellingen zijn weergegeven in figuur 8.2. Voor de boomgaard heeft de betreffende figuur betrekking op de regenbui van 20 juni 1992, voor het maïsperceel (Ransdaal) en het bietenperceel (Etzenrade) op de regenbui van 5 juni 1992, en voor het aardappelenperceel (Catsop) op de regenbui van 28-30 mei 1993. De resultaten van de boomgaard zijn afkomstig van de bovenste twee meetkasten, die van het maïsperceel van de bovenste en onderste meetkast, en die van het bieten- en aardappelenperceel van de onderste. Per pagina zijn aan de linkerzijde de resultaten van de hoger op het perceel liggende meetkast weergegeven en aan de rechterzijde van de lager gelegen meetkast. Per helling zijn steeds drie (willekeurige) dieptes

gepresenteerd. Uit figuur 8.2. kan geconcludeerd worden dat gemeten en berekende drukhoogten in het algemeen goed overeen komen. Tevens is te zien dat op alle drie de hellingen de toplaag verzadigd raakt gedurende de regenbui. De dikte van deze verzadigde laag is verschillend per helling maar kan ook verschillend zijn per regenbui.

Vertikale versus laterale stromingscomponent
Uit dergelijke twee-dimensionale simulaties kan een evaluatie gemaakt worden van de mate van vertikaal gericht water transport ten opzichte van parallel aan het oppervlak gericht transport door de bodem. Indien het laterale transport (subsurface flow) gedurende dergelijke regenbuien verwaarloosbaar klein is ten opzichte van het vertikaal gerichte transport, kan in het LISEM-model het water transport door de bodem één-dimensionaal gesimuleerd worden. Voor twee 'zomerbuien' (28-30 mei 1993 en 5 juni 1992) en twee 'winterbuien' (6 april 1993 en 25 oktober 1992) is een dergelijke evaluatie van vertikale en laterale stromingscomponenten uitgevoerd. In figuur 8.3. zijn voor de vier meethellingen voor één van deze regenbuien de gesimuleerde fluxen per meetlocatie en per laag weergegeven in de vorm van histogrammen.

Uit de histogrammen kan geconcludeerd worden dat, binnen het tijdsbestek van een regenbui, de laterale water verplaatsing door de vier hellingen in het algemeen erg klein is ten opzichte van de vertikale component. Dit is het directe gevolg van het feit dat de onderscheiden bodemhorizonten zich bodemfysisch nagenoeg identiek gedragen, zodat er sprake is van min of meer isotrope hellingen. Jackson (1992) heeft recentelijk aangetoond dat gedurende een regenbui volledig vertikaal gericht water transport verwacht mag worden in compleet isotrope hellingen. De bevinding dat de netto optredende hoeveelheid laterale water verplaatsing gedurende de gesimuleerde regenbuien zeer gering is heeft ons ertoe gebracht om bovenstaande buien eveneens met een één-dimensionaal waterstromingsmodel door te rekenen.

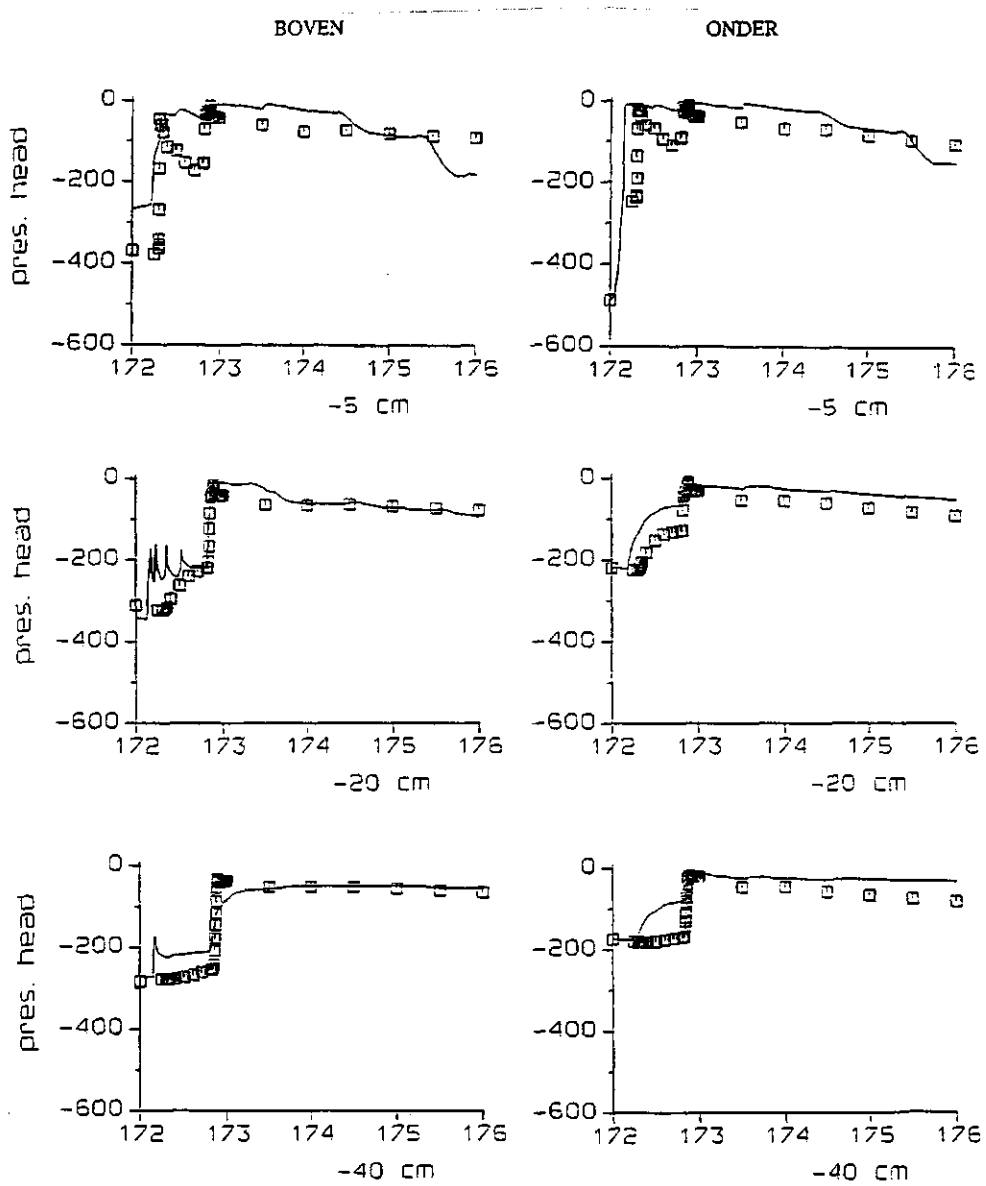


Fig. 8.2a Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'boomgaard' in het stroomgebied St. Gillisstraat, tijdens een regenbui op 20 juni 1992

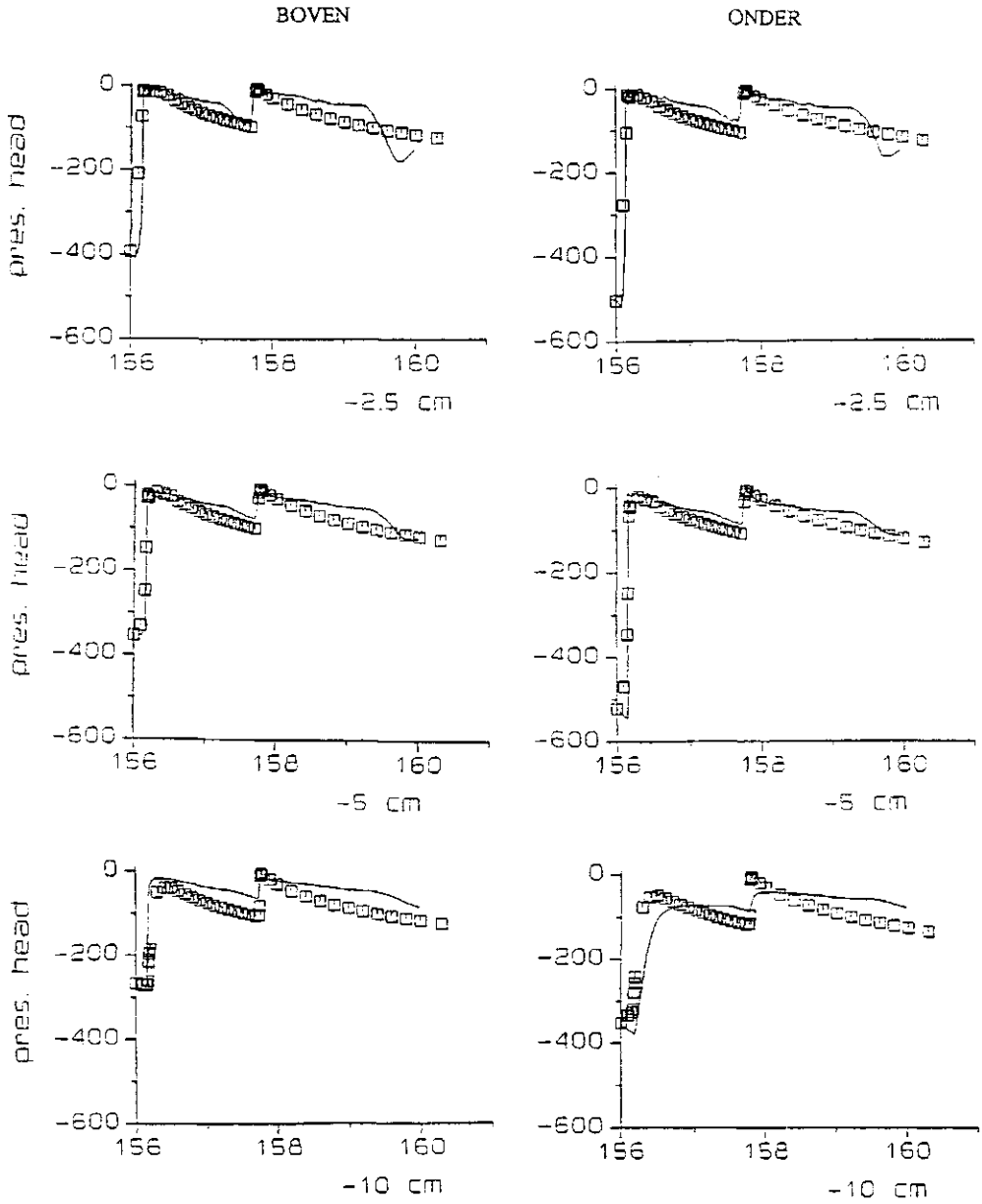


Fig. 8.2b Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'maïs' in het stroomgebied St. Gillisstraat, tijdens een regenbui op 5 juni 1992

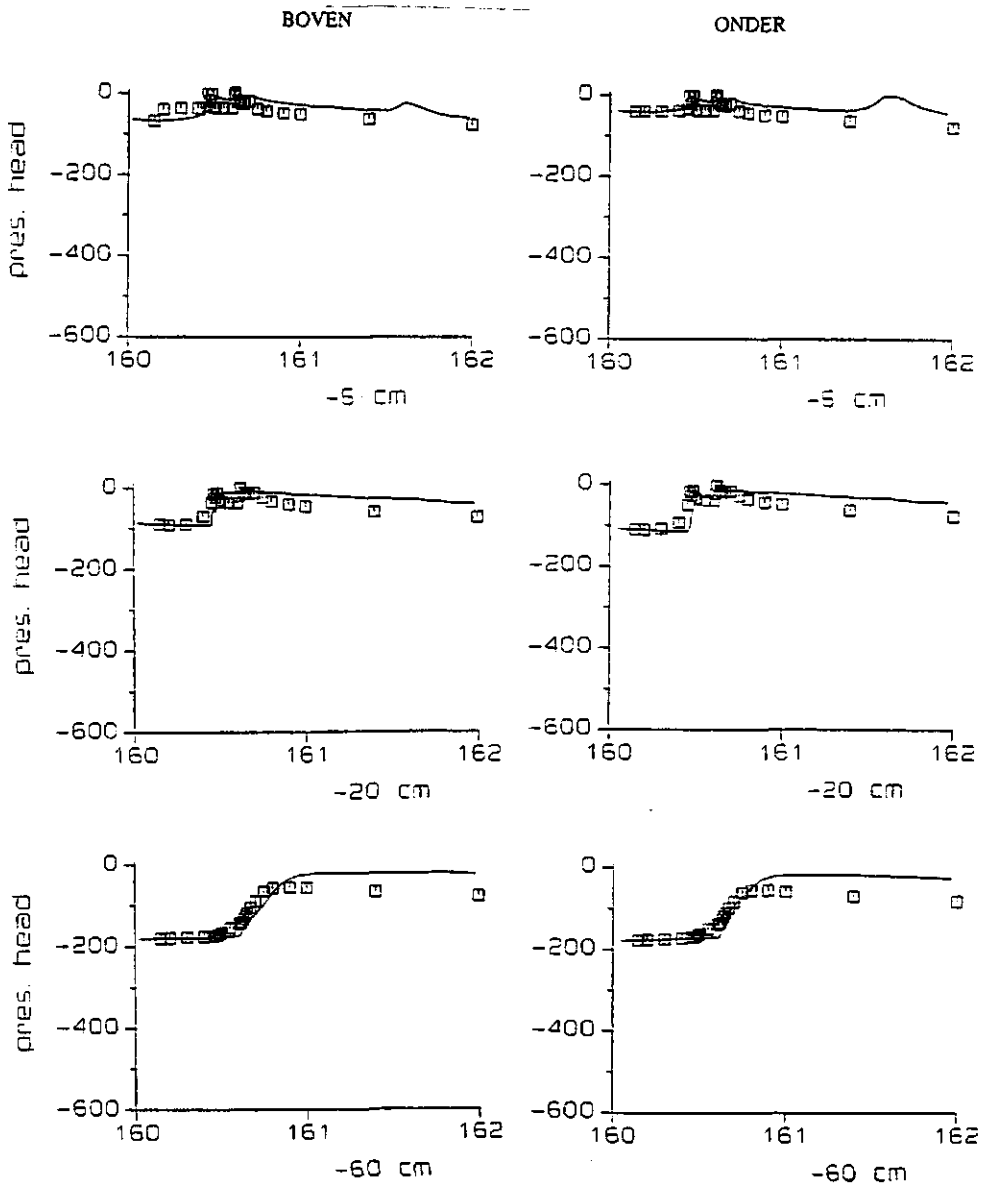


Fig. 8.2c Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn)voor de helling 'bieten' in het stroomgebied Etzenrade, tijdens een regenbui op 5 juni 1992

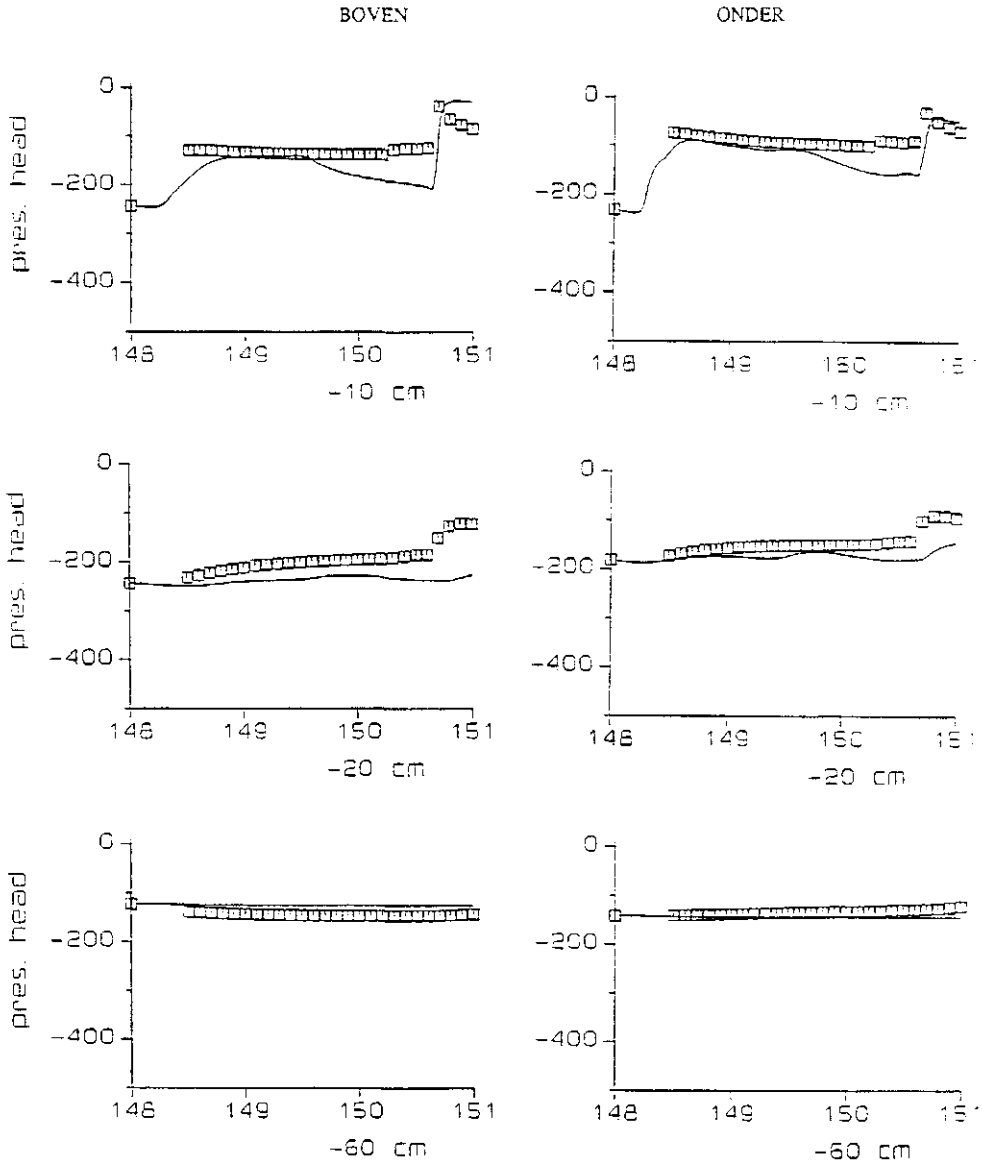


Fig. 8.2d Resultaten van gemeten (blokjes) en m.b.v. SWMS_2D berekende vochtspanningen (doorgetrokken lijn) voor de helling 'aardappelen' in het stroomgebied Catsop, tijdens een regenbui op 28-30 mei juni 1993.

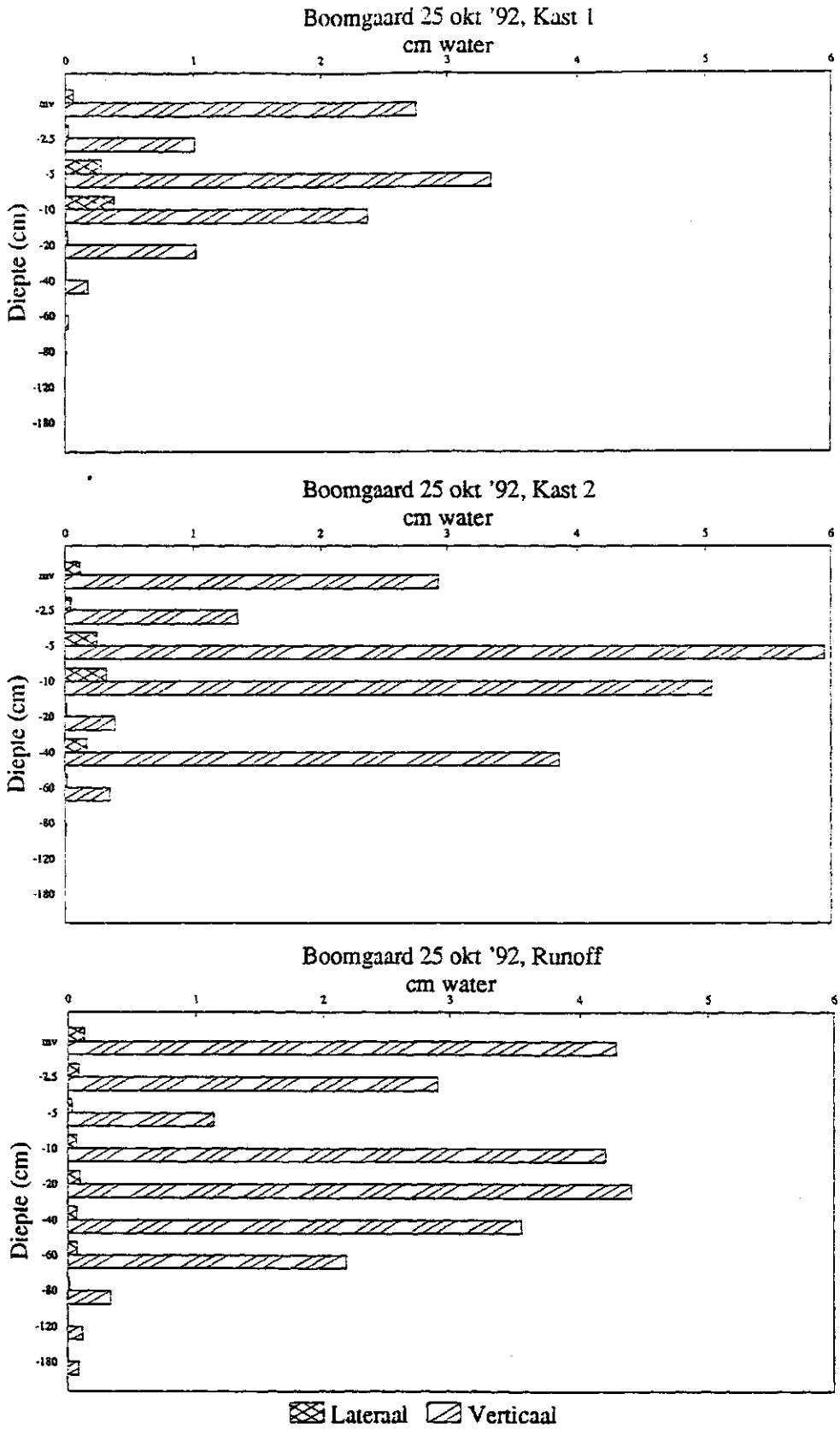


Fig. 8.3a Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'boomgaard' in het stroomgebied St. Gillisstraat (Ransdaal)

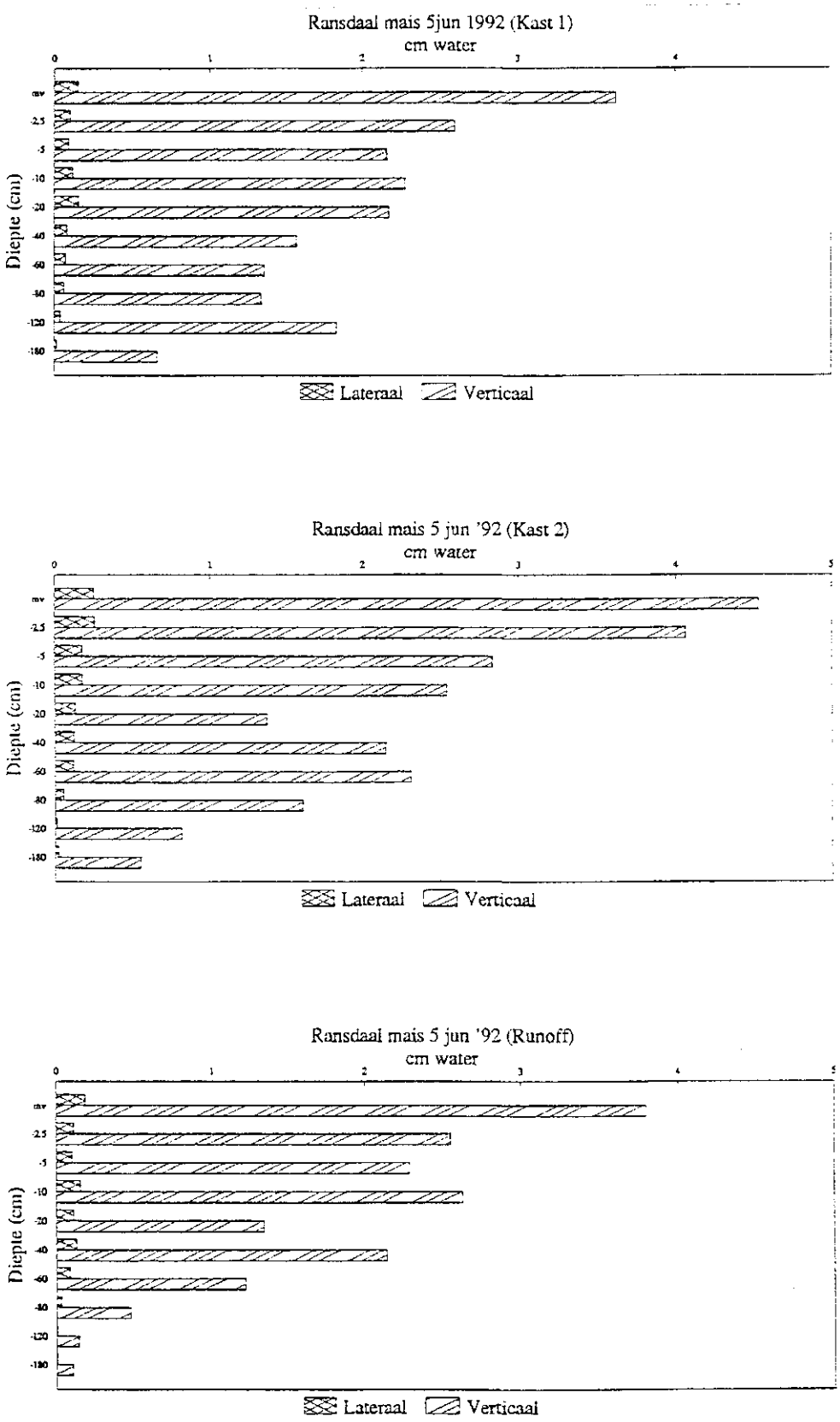


Fig. 8.3b Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'maïs' in het stroomgebied St. Gillisstraat (Ransdaal)

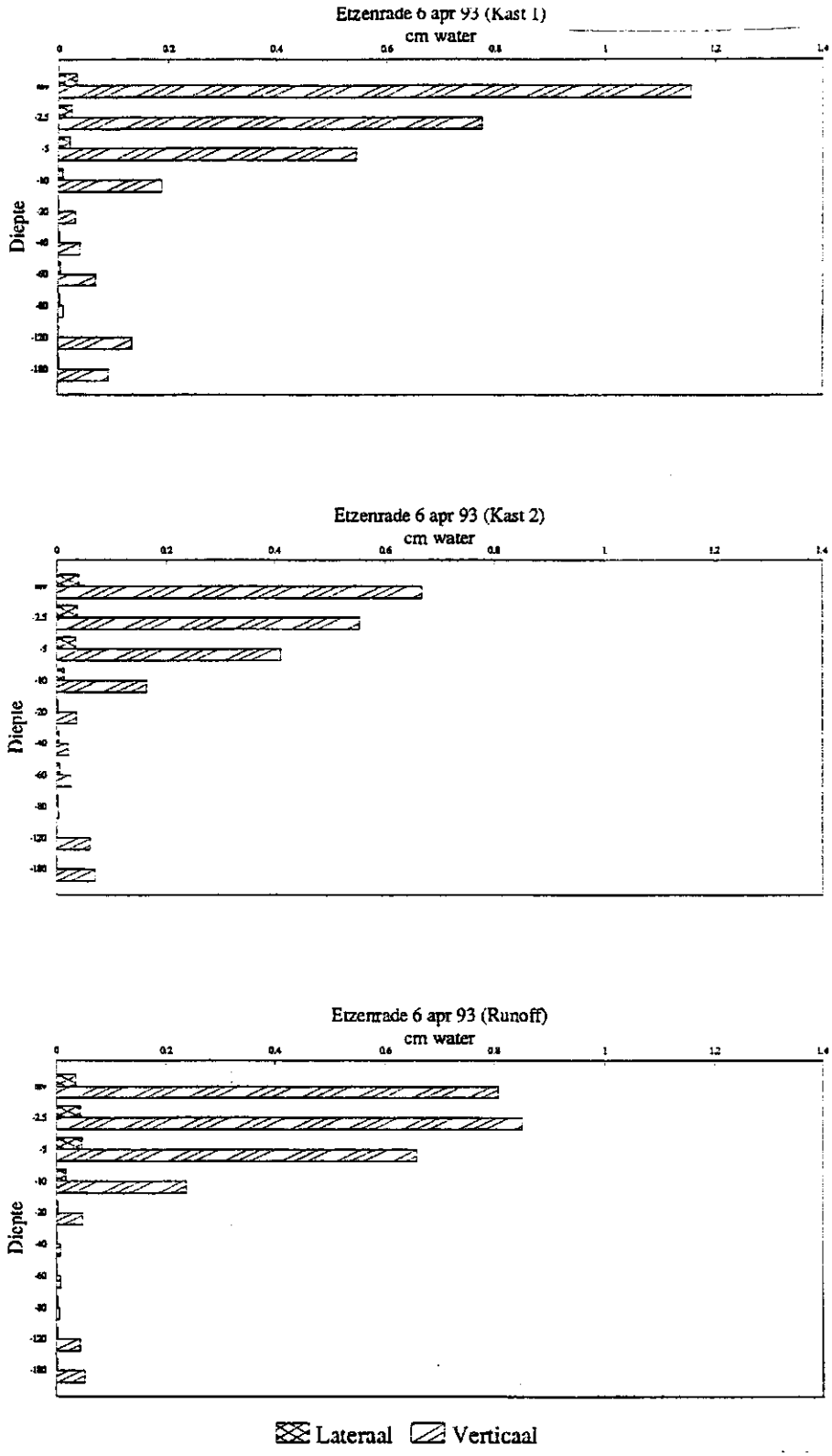


Fig. 8.3c Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'bieten' in het stroomgebied Etzenrade

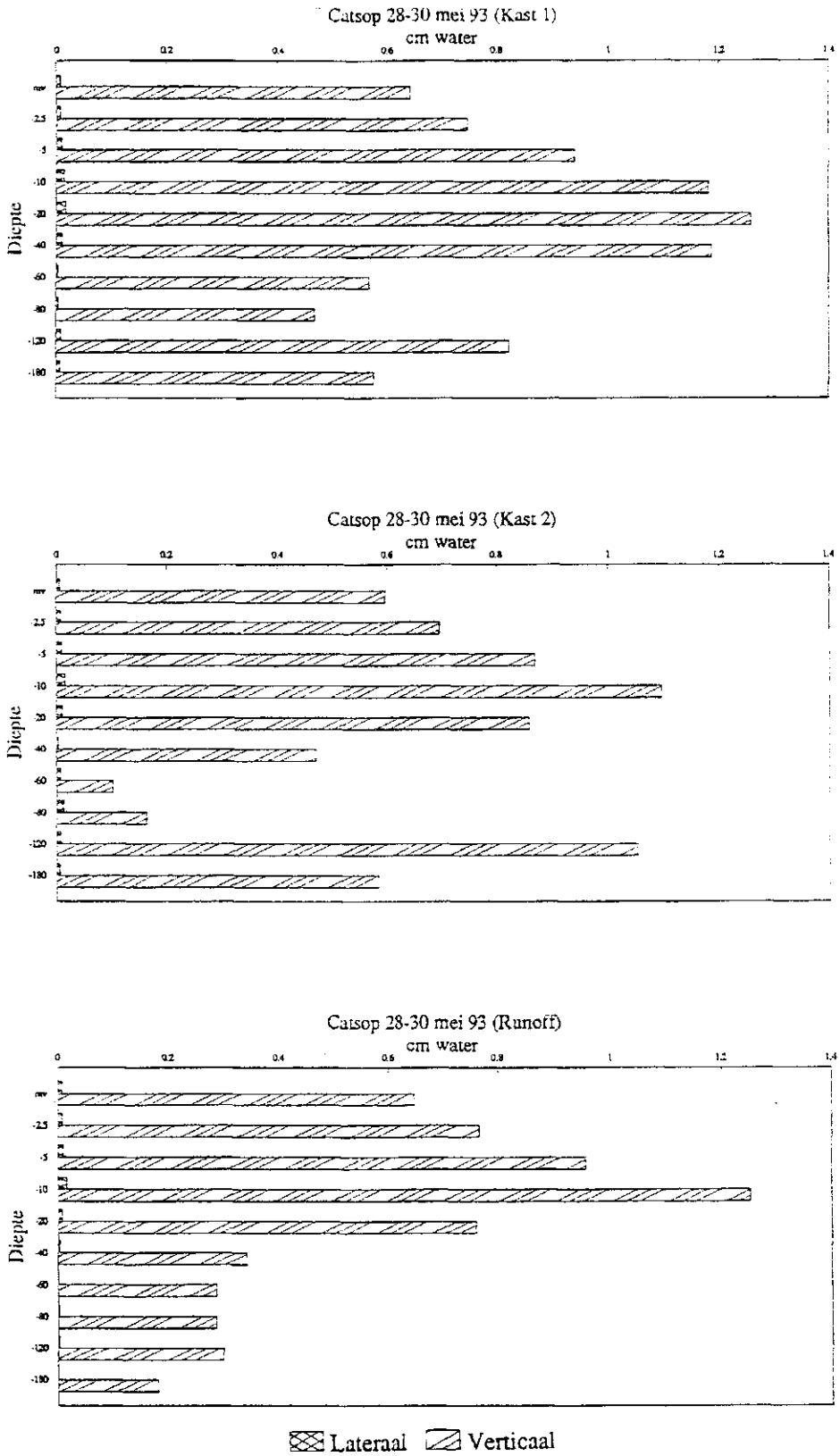


Fig. 8.3d Berekende laterale en vertikale waterverplaatsingen tijdens een regenbui op de helling 'aardappelen' in het stroomgebied Catsop

8.2.2. Eén-dimensionale versus twee-dimensionale aanpak

Als één-dimensionaal waterstromingsmodel is een 'uitgeklede' versie van het alombekende SWATRE-model (Feddes et al., 1978, Belmans et al., 1983) gebruikt. Voor elk van de meetlocaties op de vier hellingen zijn dezelfde invoergegevens gebruikt als in de hierboven beschreven twee-dimensionale modelberekeningen, dat wil zeggen identieke profielopbouw en meteogegevens. De gesimuleerde vochtspanningen met het ééndimensionale en twee-dimensionale model zijn voor een vast aantal tijdstippen gedurende de regenbuien tegen elkaar uitgezet om vergelijking van de twee modellen mogelijk te maken.

De resultaten van deze model-exercities zijn weergegeven in figuur 8.4. Uit deze vier deelfiguren valt af te lezen dat de met behulp van het één-dimensionale en twee-dimensionale model gesimuleerde vochtspanningen praktisch identiek zijn.

In totaliteit kan gesteld worden dat voor de vier hellingen de laterale stromingscomponent absoluut gezien een marginale bijdrage levert aan de totale waterverplaatsing door de bodem gedurende de betreffende regenbuien. In vergelijking met de vertikale waterverplaatsing kan deze laterale stroming dan ook verwaarloosbaar geacht worden. Deze bevindingen hebben ertoe geleid dat de 'uitgeklede' SWATRE versie in het LISEM-model is ingebouwd (zie hoofdstuk 7).

8.3 Validatie van het stroomgebiedsmodel LISEM

8.3.1 Validatie procedure

De benodigde data voor de validatie zijn opgeslagen in het GIS. Alle invoergegevens voor een simulatie van een gemeten bui zijn uit de veldgegevens geselecteerd. De stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat zijn gesimuleerd met een gridcelgrootte van 10 bij 10 m. Het stroomgebied Etzenrade is gesimuleerd met een celgrootte van 20 bij 20 m. Vervolgens zijn de modelresultaten vergeleken met de geobserveerde data (validatie).

Er bestaan verschillende statistische criteria die de mate van overeenkomst tussen de gemeten en de gesimuleerde hoeveelheid afvoer ('goodness of fit') beschrijven. De McCuens coëfficiënt (McCuen & Snyder, 1975) is gebruikt voor het vergelijken van de geobserveerde en gesimuleerde waarden van de waterafvoer. Om de geobserveerde en de gesimuleerde hoeveelheid sediment met elkaar te vergelijken wordt de normale (Pearsons) correlatie-coëfficiënt gebruikt. De met elkaar vergeleken factoren zijn:
— gemiddelde oppervlakkige afstroming (l/s), als maat voor de totale afvoer
— piekafvoer (l/s)
— tijdstip van piekafvoer (min)
— piekwaarde van het sedimentgehalte (g/l)

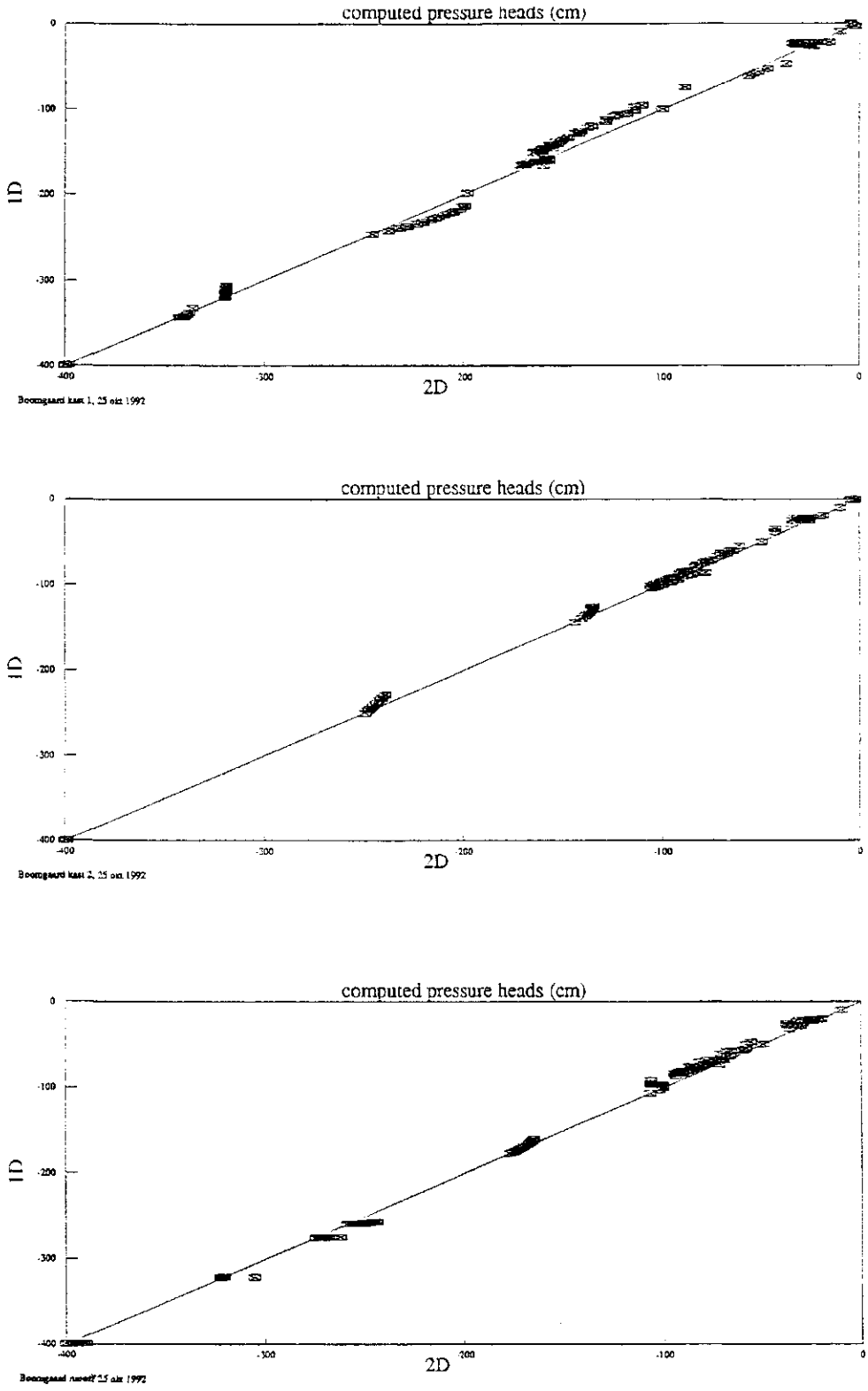


Fig. 8.4a Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling 'boomgaard', St. Gillisstraat.

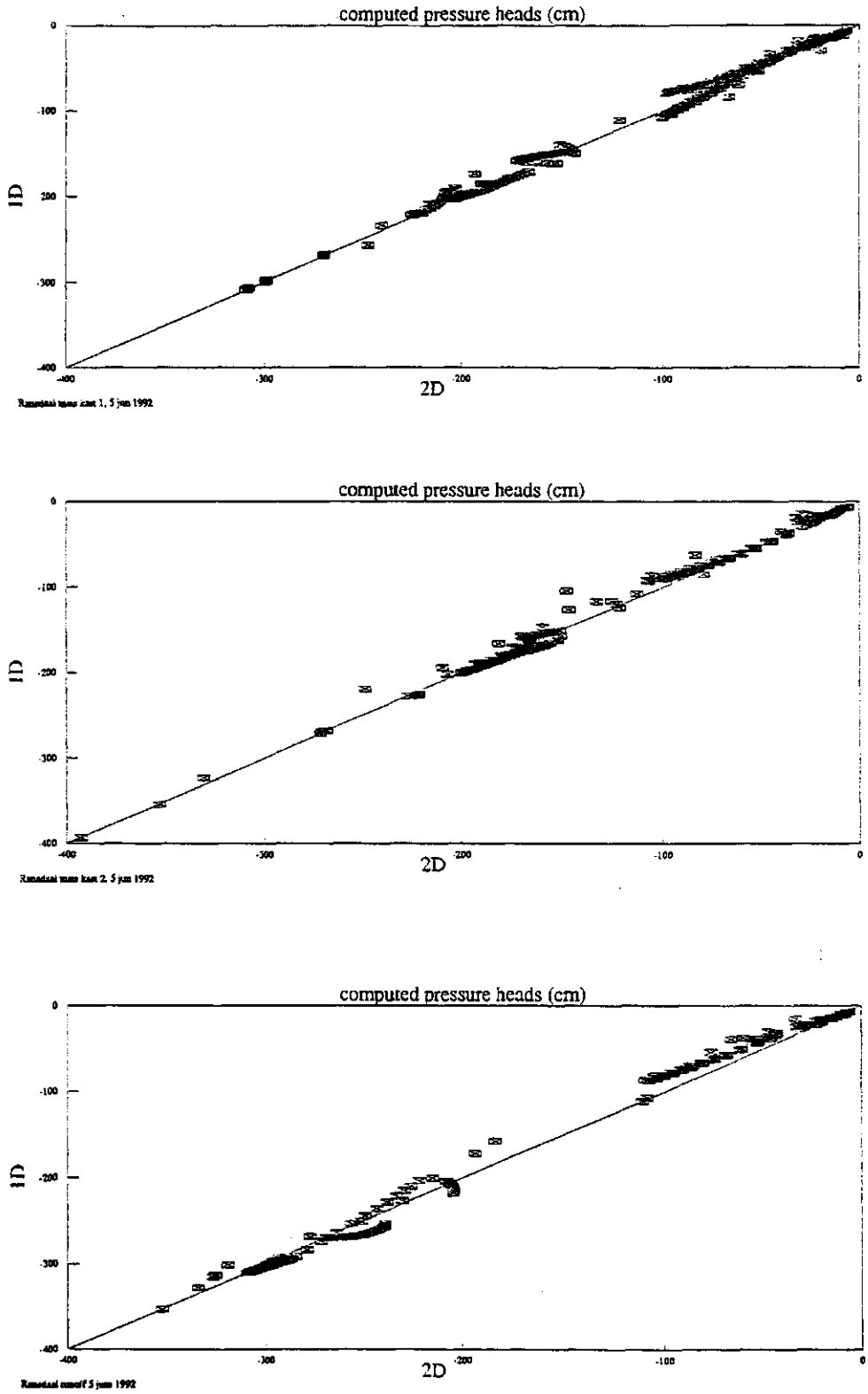
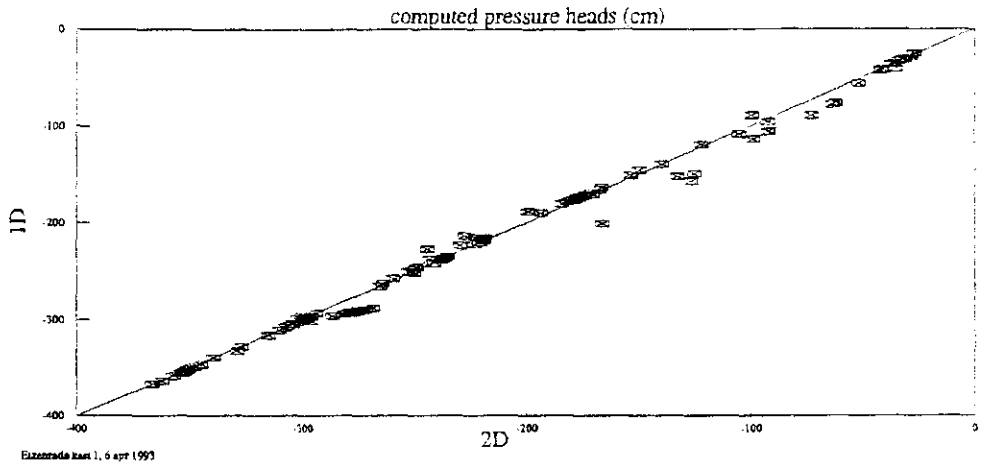
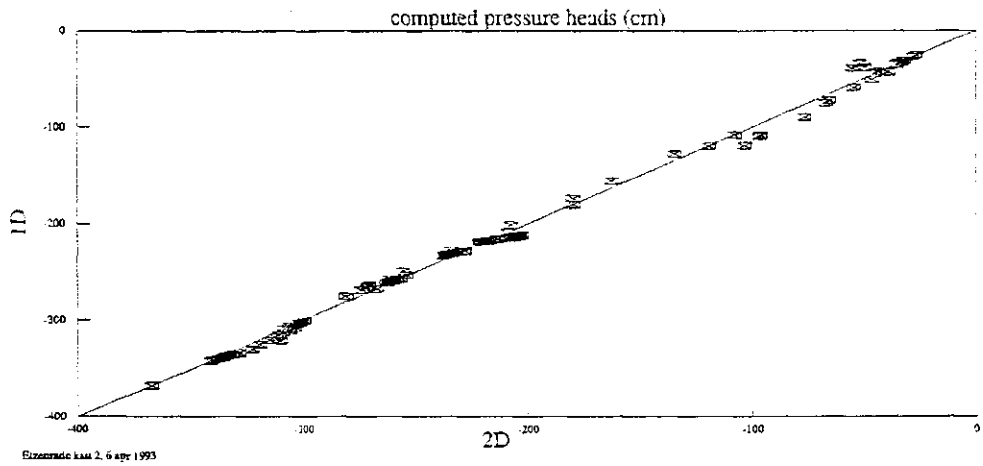


Fig. 8.4b Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling 'maïs', St. Gillisstraat





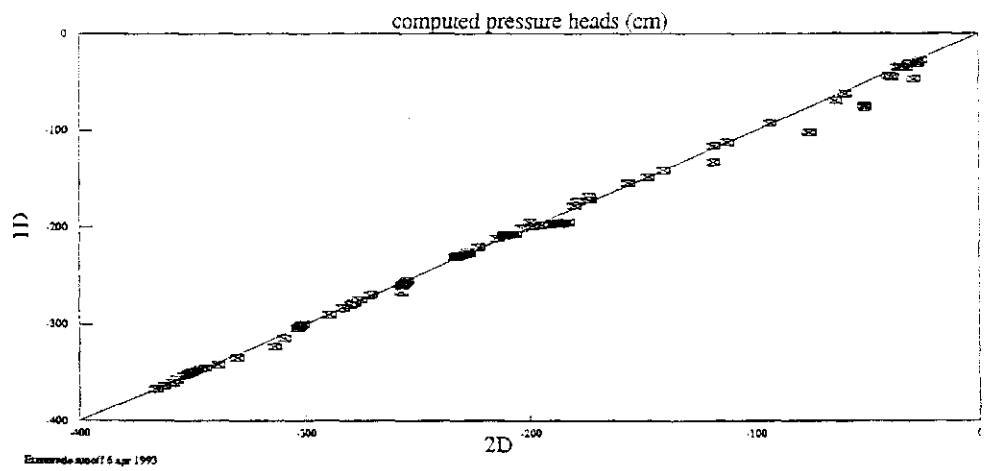


Fig. 8.4c Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling Etzenrade

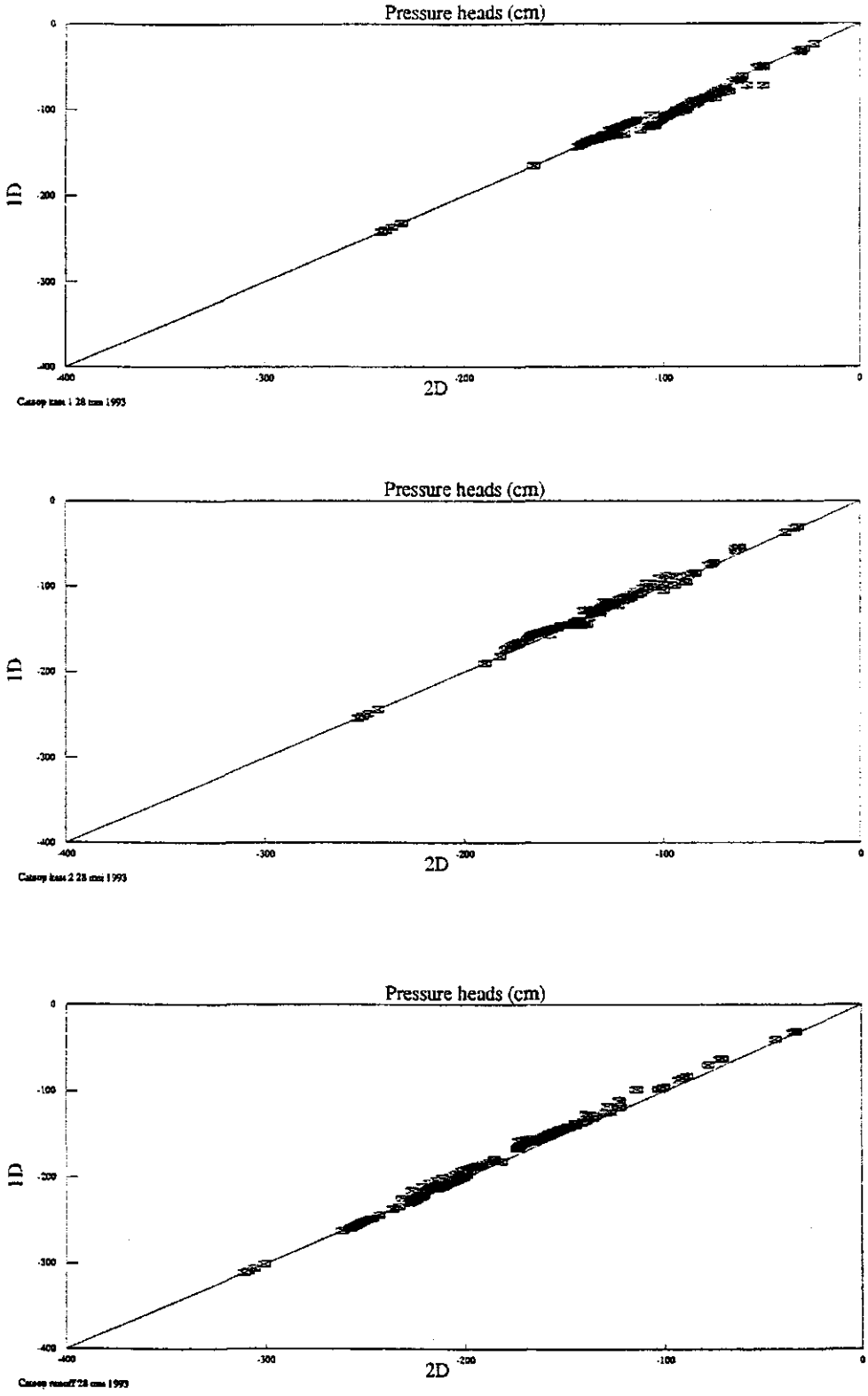


Fig. 8.4d Door SWMS_2D gesimuleerde vochtspanningen (2-D) versus door SWATRE gesimuleerde vochtspanningen (1-D) voor de helling Catsop

— gemiddelde sediment concentratie in de afvoer (g/l), als maat voor het totale bodemverlies
— het gesimuleerde en het uit de metingen berekende bodemverlies (ton)
— het waargenomen en gesimuleerde patroon van oppervlakkig afstromend water.

8.3.2 Test runs en calibratie

Ten behoeve van de validatie van het LISEM-model zijn in eerste instantie een groot aantal test runs gedraaid. Uit de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 7) was al gebleken dat naast de doorlatendheid de initiële drukhoogte een gevoelige modelvariabele is, zoals ook het geval is in de meeste andere hydrologische modellen op dit schaalnivo. Op grond van deze bevinding zijn tevens diverse simulaties uitgevoerd met diverse calibratie-waarden van de initiële drukhoogte (tabel 8.1)

Tabel 8.1 Testresultaten van simulatie runs in het stroomgebied St. Gillisstraat met variabele initiële drukhoogte

Datum	31-12-1993	02-01-1994	03-01-1994
gemeten piekafvoer (l/s)	700	134	164
gehele profiel verzadigd (t/m 120 cm)	1008	271	110
verzadigd tot 100 cm	300	146	63
verzadigd tot 70 cm	270	32	6
verzadigd tot 50 cm	212	13	2
verzadigd tot 30 cm	112	6	1
met de geschatte drukhoogten	91	0	0
gecalibreerde waarde (cm)	110	90	>120

Uit tabel 8.1 blijkt dat de gemeten piekafvoer in alle gevallen correct te simuleren is met een bepaalde drukhoogte. De drukhoogte is door een niet volledige dataset, hetgeen bijna altijd onvermijdelijk is, in een aantal gevallen geschat. Uit de simulaties blijkt dat voor 31 december de gecalibreerde drukhoogte op 110 cm verzadiging uitkomt, voor 2 januari op 90 cm verzadiging en voor 3 januari op >100 cm verzadiging. Verwacht zou kunnen worden dat, bij deze aanhoudende neerslag, het bodemprofiel in de loop der dagen natter wordt. Deze gecalibreerde reeks toont dit beeld niet. Geconcludeerd wordt dat het verschil tussen gemeten en gesimuleerde afvoeren onder andere verklaard kan worden door (niet gemeten) variaties in drukhoogten voor de aanvang van een bui, met andere woorden variaties in de invoer. Uit test simulaties van zomerbuien blijkt dat calibratie niet zinvol is omdat het gesimuleerde beeld niet eenduidig is en er geen systematische fouten optreden. Sommige gesimuleerde afvoeren zijn hoger dan de gemeten afvoeren, andere lager. Er zijn diverse simulaties met een voor 1 bui aangepaste (gecalibreerde) drukhoogte uitgevoerd. Dit geeft voor een individuele bui dan wel een beter resultaat, maar toepassing van deze gecalibreerde waarde voor andere buien leidde juist tot een slechter resultaat. Daarom is voor de zomerbuien geen calibratie toegepast.

De winterbuien echter, worden het best gesimuleerd wanneer voor het bodemprofiel van 0 tot en met 70 verzadigd is met water (drukhoogte 0). De gecalibreerde waarde van de drukhoogte wijkt nauwelijks af van de werkelijk optredende veldsituatie, waarbij de drukhoogte veelal tussen de 0 en -10 cm ligt (pF 0-1). Mede gezien de

meetnauwkeurigheid (5 cm) en de extrapolatie van 12 puntmetingen van drukhoogte naar een volledig stroomgebied, zijn de gecalibreerde drukhoogtes niet onrealistisch.

8.3.3 Validatie runs

Op grond van bovenstaande bevindingen zijn de zomerbuien uiteindelijk gesimuleerd met de oorspronkelijke gemeten waarden voor de variabelen, m.a.w. zonder enige vorm van calibratie, en de winterbuien met een gecalibreerde drukhoogte tot en met 70 cm. De beste resultaten voor de hoeveelheid sediment in vergelijking met de gemeten waarden worden eveneens verkregen zonder calibratie van de parameters in de transport vergelijking. Uit de test simulaties is tevens gebleken dat de resultaten van de simulaties van een bodem met korst en van een bodem met korst en scheur nauwelijks verschillen. In werkelijkheid treedt de laatste situatie het meest op.

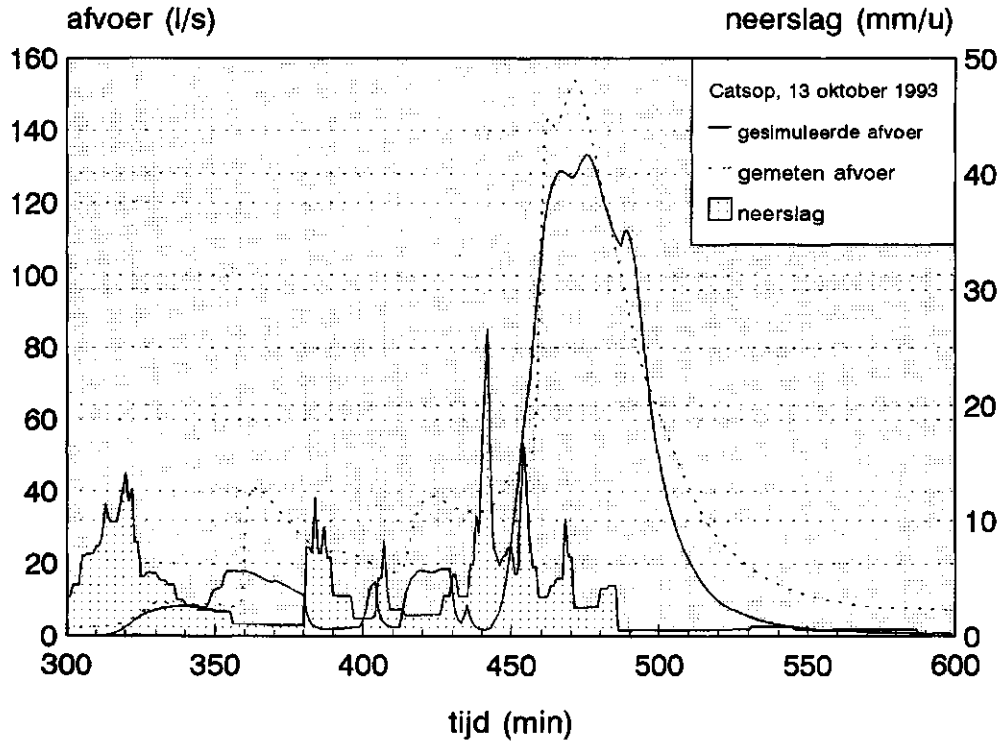


Fig. 8.5 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied Catsop

Daarom is gesimuleerd met de bodemfysische tabellen voor korst en scheur. De resultaten van de simulaties staan vermeld in tabel 8.2. In figuur 8.5 t/m 8.7 is van elk gebied één afvoerverlooplijn (hydrograaf) weergegeven. Deze geven weer dat het model in een aantal gevallen de buien goed simuleert.

Uit de validatie blijkt kwalitatief dat de waargenomen (fig 3.14 t/m 3.16) en gesimuleerde ruimtelijke patronen van oppervlakkig afstromend water (fig 7.5) goed met de werkelijkheid overeenkomen.

Uit tabel 8.2 blijkt dat het model voor buien, waar in het veld bijna geen afvoer gemeten, ook geen afvoer simuleert. In figuur 8.8 en 8.9 worden respectievelijk de gemeten en de gesimuleerde hoeveelheid piekafvoer en gemiddelde afvoer weergegeven.

Uit tabel 8.2 blijkt verder dat er in sommige gevallen aanzienlijke verschillen bestaan tussen de gemeten en de gesimuleerde afvoeren en sedimentconcentraties. De grootste afwijkingen treden op door de onzekerheden in de doorlatendheid en het ontbreken van neerslag gegevens en/of drukhoogte-gegevens. Uit de verschillende simulaties van 2/3 januari 1994 (St. Gillisstraat) blijkt, dat de verschillen tussen simulaties en metingen hierdoor verklaard kunnen worden (tabel 8.1).

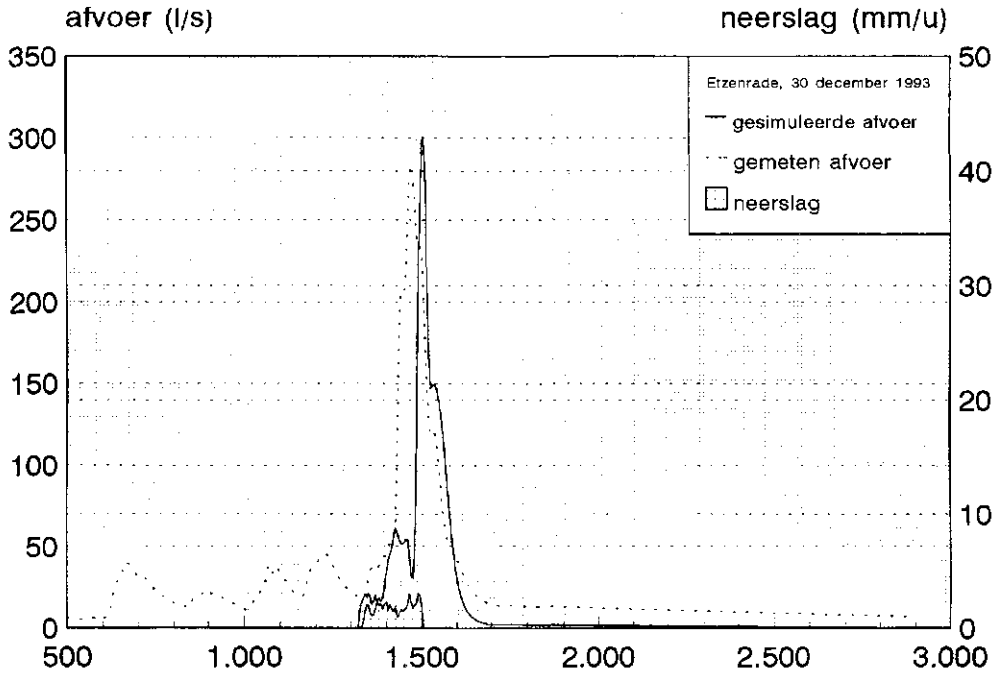


Fig. 8.6 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied St. Gillisstraat

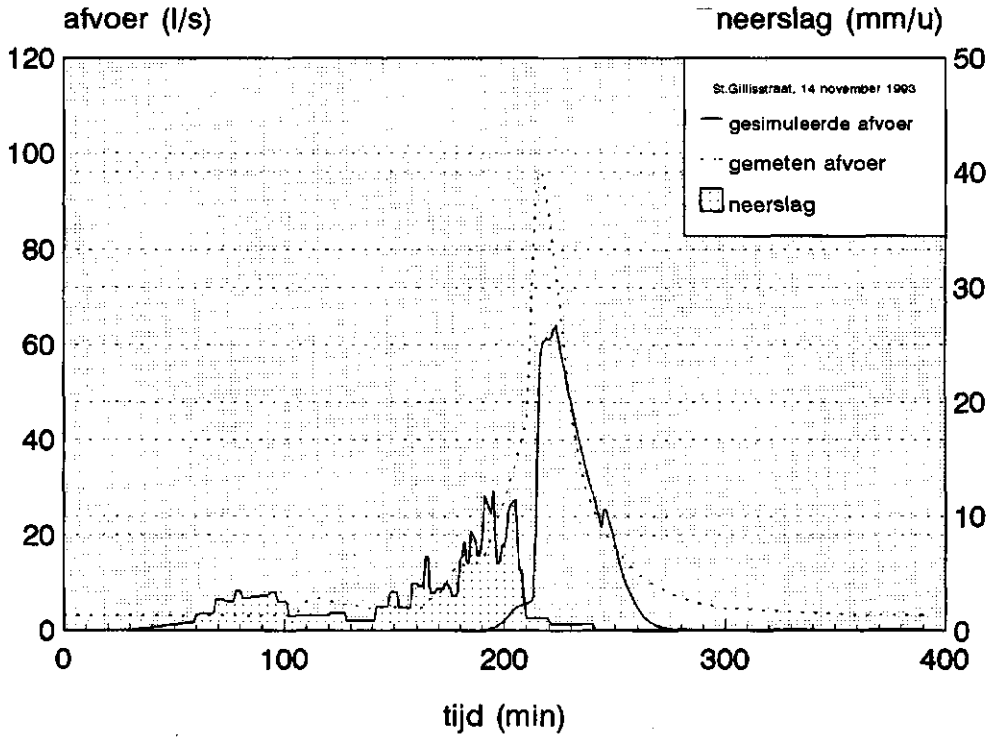


Fig. 8.7 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde afvoer in het stroomgebied Etzenrade

Tevens speelt de ruimtelijke en temporele variatie in relatie tot de gevoeligheid van de doorlatendheden van de bodem (hoofdstuk 7) een rol.

Tabel 8.2 Validatie-resultaten van de afvoer van de belangrijkste buien. De McCuen's coëfficiënt geeft de correlatie aan tussen alle gemeten en gesimuleerde waterafvoeren van de hydrograaf

Datum bui	Gem.gemeten afvoer (l/s)	Gem.gesim afvoer (l/s)	Gemeten piekafvoer (l/s)	Gesimuleerde piekafvoer (l/s)	McCuens coëfficiënt (-)
Catsop					
22-01-93	25,05	12,57	95,56	77,29	0,825
30-05-93	50,70	124,97	343,61	411,08	0,415
14-10-93	25,47	17,52	153,82	133,36**	0,929
St,Gillisstraat					
04-06-92	1,12	0,06	4,98	0,39	-0,949
24-08-92	2,03	0,05	4,23	0,12	0,022
11-01-93	10,91	14,88	34,45	88,02**	-0,027
12-01-93	52,76	5,88	127,36	30,02**	-0,025
14-11-93	18,36	12,89	96,38	145,86	0,423
31-12-93	212,32	53,67	700,00	300,75**	0,180
02-01-94	30,31	27,66	134,07	146,47**	0,305
03-01-94	22,11	8,41	164,43	63,21**	0,029
Etzenrade					
08-06-92	28,89	114,48	462,00	2504,66*	0,120
05-07-92	56,88	90,88	337,00	383,11	0,255
28-08-92	3,00	0,00	3,00	0,00	-------
25-10-92	22,40	9,02	121,00	106,39	0,679
11-11-92	26,36	122,00	232,00	1276,23*	0,045
17-11-92	38,35	42,84	164,00	406,24**	0,324
11-01-93	17,28	3,79	77,00	64,97	0,738
12-01-93	31,05	717,34	79,00	2042,13*	0,028
22-01-93	12,30	4,05	94,00	71,27	0,618
12-05-93	18,00	0,00	19,00	0,00	-------
14-10-93	113,75	36,80	588,00	377,88	0,518
13-12-93	76,39	10,70	260,00	115,16**	0,410
30-12-93	31,45	13,52	284,00	300,74**	0,617

*: maar één regenmeter beschikbaar
**: geen gemeten drukhoogte-gegevens beschikbaar
schatting van de drukhoogten

Hieronder wordt nader ingegaan op de mogelijke onnauwkeurigheden in modellen. Modellen, hoe goed ze conceptueel ook zijn, blijven een benadering van de werkelijkheid. Echter, vergeleken met andere, niet of nauwelijks gecalibreerde, modellen (ANSWERS, KINEROS, AGNPS) op het schaalniveau van de kleine stroomgebieden, vallen deze verschillen mee. Uit tabel 8.1 blijkt dat 13 van de 22 simulaties van redelijk zware buien een McCuen coëfficiënt groter dan 0.25 kennen, hetgeen een redelijk goede simulatie betekent. De standaard (Pearson) correlatie coëfficiënt tussen gemeten en gesimuleerde afvoer ligt bij deze McCuen waarden dan tussen de 0,6 en 1,0. Zeven van de 22 simulaties hebben een McCuen coëfficiënt groter dan 0,5, hetgeen een zeer goed simulatie resultaat is.

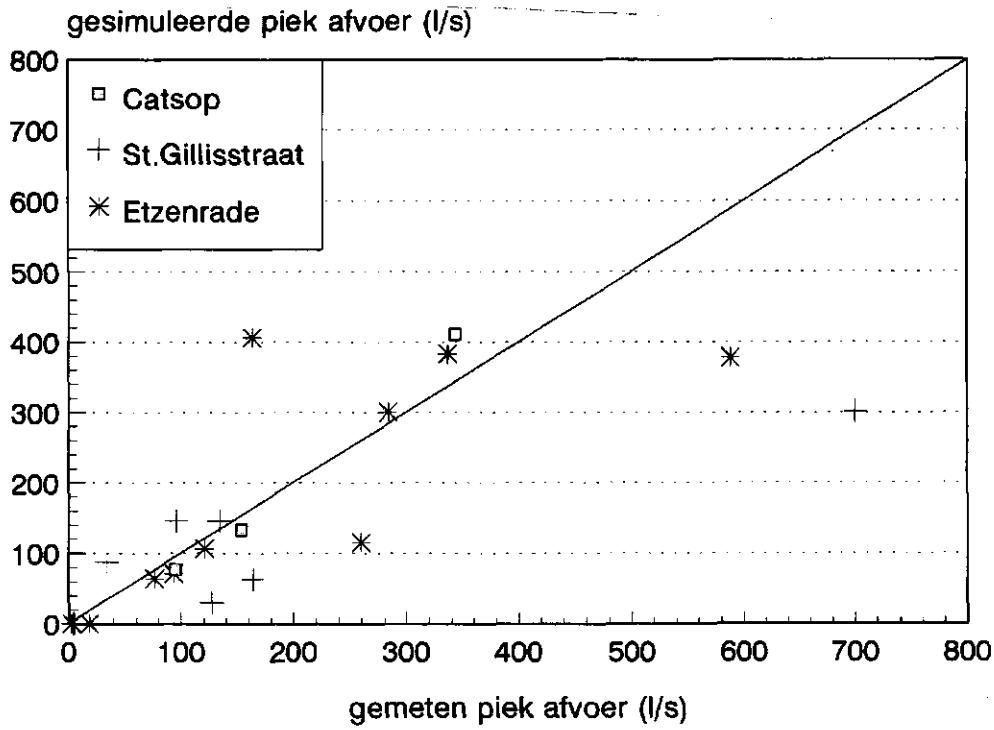


Fig. 8.8 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde piekafvoeren van enkele buien

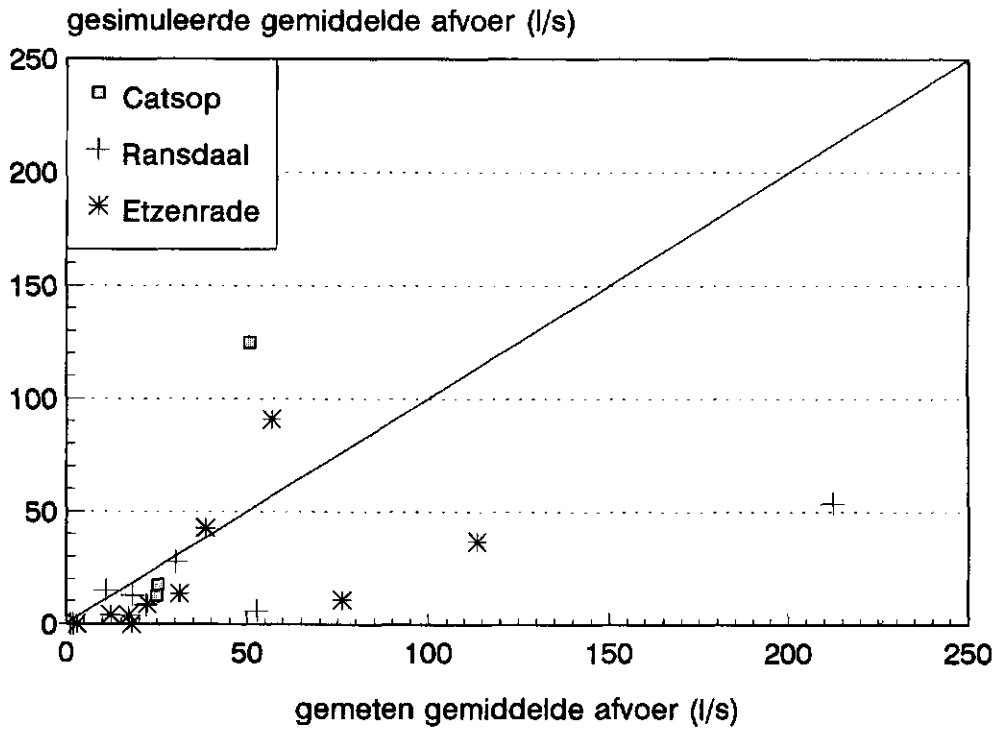


Fig. 8.9 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde gemiddelde afvoeren van buien

In negen gevallen voorspelt het LISEM-model de afvoer dus minder goed. In drie gevallen (Etzenrade 080692, 111192, 120193) is het ontbreken van neerslaggegevens

de duidelijke oorzaak. In deze gevallen zijn slechts gegevens van één regenmeter beschikbaar. In een optimale situatie zijn de gegevens van drie regenmeters beschikbaar zijn. Indien slechts de gegevens van één regenmeter beschikbaar is in Etzenrade, kan de werkelijke neerslag in onvoldoende mate gesimuleerd worden. Door het gebruik van slechts één regenmeter wordt de (gesimuleerde) neerslag blijkbaar overschat. Voor twee buien in Etzenrade is de simuleerde afvoer 0 l/s waardoor er geen McCuens-coëfficiënt berekend kan worden.

8.3.4. Oorzaken van verschillen tussen gemeten en gesimuleerde waarden

Er zijn veel oorzaken van verschillen tussen gemeten en gesimuleerde waarden in gedistribueerde hydrologische en bodemerosiemodellen. Een belangrijk uitgangspunt is echter dat modellen, hoe goed ze conceptueel ook zijn, een benadering blijven van de werkelijkheid. Er zullen dus altijd verschillen zijn tussen gemeten en gesimuleerde waarden. Zoals hierboven reeds aangegeven treden bij deze LISEM simulaties de grootste afwijkingen op door het ontbreken van neerslag gegevens en/of drukhoogte-gegevens. Tevens speelt de ruimtelijke en temporele variatie in relatie tot de gevoeligheid van de doorlatendheden van de bodem een rol.

De kennis van onnauwkeurigheden of 'fouten' in fysisch-deterministische modellen is belangrijk om een juist oordeel te vellen over een model. Er kunnen fouten optreden in de theoretische structuur van het model, fouten in de mathematische oplossingsmethoden in het model, calibratie fouten en fouten in de invoergegevens (De Roo, 1993).

Fouten in de invoergegevens worden veroorzaakt door **ruimtelijke en temporele variabiliteit van de invoervariabelen**, zoals neerslag (Etzenrade!; onvoldoende/uitvallen van regenmeters), bodemfysische karakteristieken (doorlatendheidsmetingen), bodemvochtgehalte en de erodibiliteit van de bodem. Zo vertonen de doorlatendheidskarakteristieken van alle bodemeenheden een behoorlijke variatie. Tevens bestaat er een verschil tussen de gemeten en gefitte verzadigde doorlatendheid. In de modelsimulaties is met een waarde gewerkt die tussen deze extremen ligt. Deze variaties in metingen kunnen voor een belangrijk deel de verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde waarden verklaren. Vele andere factoren dan deze kunnen echter de werkelijke oorzaak van de verschillen zijn. Zo zullen er vrijwel altijd lokale en tijdelijke omstandigheden zijn die niet als zodanig in het model meegenomen worden. Te denken valt hierbij aan 'sediment traps' op wegen (takken, stenen, kuilen (Etzenrade), en sedimentvang in en voor waterlossingen (Catsop)) en tijdelijk onbegroeide watergangen, zoals kort na de aanleg van de St. Gillisstraat meetgoot.

Bovendien kunnen er fouten optreden bij het representeren van de invoergegevens in het model, als gevolg van opgetreden fouten bij het digitaliseren en het verrasteren binnen de GIS-verwerking, en fouten bij het berekenen van hellingpercentages uit de hoogte matrix. Deze groep fouten is door een zorgvuldige werkwijze zo minimaal mogelijk gehouden.

Tenslotte kunnen er fouten zitten in de meetgegevens die gebruikt worden bij de validatie van de modellen, zoals fouten in de gemeten sedimentconcentraties, de afvoer en het bodemverlies.

Veel wetenschappers concentreren zich op de ontwikkeling van de theoretische structuur van een model. Zij proberen om de leemten te vullen in ons begrip van de hydrologische en bodemerosie processen, hetgeen zeer belangrijk onderzoek is. Echter, de fouten in de invoergegevens kunnen een groter effect hebben op de modelsimulatie resultaten dan de fouten in de theoretische aanpak. Een groot probleem bij het pogen om nauwkeurig te modelleren is de mate waarmee betrouwbare locatie-specifieke schattingen van attributen (invoer-variabelen) gemaakt kunnen worden. Omdat modellen steeds realistischer worden hebben ze steeds meer en steeds betere gegevens nodig. Veel van deze gegevens, zoals infiltratie/doorlatendheidskarakteristieken en het initieel vochtgehalte, zijn niet altijd beschikbaar. Dit resulteert in aanzienlijke fouten in de invoer-variabelen. Bovendien is de berekening van hellingshoek en expositie vanuit een DTM ook niet vrij van fouten. Daarom is de voortplanting van fouten die optreden bij ruimtelijke bewerkingen een belangrijk probleem. Het negeren van fouten in de gegevens kan leiden tot de foutieve conclusie dat de theoretische structuur van een model niet juist is. Er is binnen de modellering wellicht een punt bereikt waarop de verzameling van adequate data belangrijker wordt dan de verdere ontwikkeling van een model (De Roo, 1993).

8.3.5. Meerwaarde van het LISEM-model

Een belangrijke kwestie is nu de meerwaarde van het LISEM-model boven bestaande modellen. Het LISEM-model levert een gedetailleerd beeld, zowel in ruimte als tijd, van de hydrologie en de bodemerosie tijdens en na een bui in een stroomgebied. Naast afvoerverlooplijnen en sedimentverlooplijnen van hoofd- en substroomgebieden, worden er kaarten geproduceerd van bodemerosie en sedimentatie en het patroon van oppervlakkige afvoer op diverse tijdstippen. Per hellingklasse en per type landgebruik kan berekend worden wat de netto hoeveelheid erosie en/of sedimentatie is, voor elk gewenst scenario. Tevens kan uitgerekend worden bij elke gewenste locatie van een waterbuffer wat de te bergen hoeveelheid water dient te zijn. De hoeveelheid en diversiteit van de resultaten van het LISEM-model is dus belangrijk groter dan bij bestaande modellen. Het erosieproces wordt bij de tot nu toe gebruikte modellen in Zuid-Limburg nog niet meegenomen en wat dat betreft levert het LISEM-model een nieuw type informatie. Een goed erosiemodel vereist een goed hydrologisch model als basis. Hiertoe is binnen het LISEM-model veel aandacht besteed aan de hydrologie in de bodem door de koppeling van een aan SWATRE verwant waterbalans model.

Daarnaast is het LISEM-model wat invoer-variabelen betreft volledig fysisch. Alle variabelen zijn dus te meten in het veld. Het model kent geen calibratie of andere onduidelijke parameters. Tevens zijn alle procesbeschrijvingen zoveel mogelijk fysisch gehouden. Empirische relaties zijn zoveel mogelijk vermeden.

Het bovenstaande impiceert nog geen kwalitatief betere resultaten. Het feit dat complexe modellen nog steeds aanzienlijke afwijkingen tussen gemeten en gesimuleerde waarden opleveren is een bekend probleem en wordt veroorzaakt door de eerder genoemde 'fouten' en onzekerheden. Deze fouten zijn voor een deel niet te vermijden. Een deel is op te lossen door nog langer en meer in het veld te meten, hetgeen, gezien de lengte van dit projekt, praktisch onhaalbaar is.

8.3.6. Validatie resultaten sediment

In tabel 8.3 worden de validatie-resultaten van de hoeveelheid sediment gegeven. In figuur 8.10 wordt de gemeten en de gesimuleerde sedimentconcentratie weergegeven. Uit tabel 8.3 en figuur 8.10 blijkt dat de gemeten en gesimuleerde piek van het sedimentgehalte dezelfde orde van grootte hebben. Dit is, zeker in vergelijking met andere modellen, een voldoende basis om de hoeveelheid bodemerosie en sedimentatie in een gebied redelijk betrouwbaar te kunnen simuleren.

Er is tevens een vergelijking gemaakt tussen het totaal gesimuleerde bodemverlies en het totale bodemverlies, berekend door interpolatie en extrapolatie van de gemeten sedimentgehaltes, vermenigvuldigd met de gemeten waterafvoer. Door het soms geringe aantal sedimentmonsters en het feit dat alleen gedurende hogere afvoeren sediment is gemeten, is deze berekening extreem onnauwkeurig. De resultaten van de vergelijking kunnen daarom nauwelijks geïnterpreteerd worden. Een vergelijking van de gemeten en gesimuleerde gemiddelde sedimentconcentratie geeft een betrouwbaarder beeld.

Tabel 8.3 Validatie-resultaten van de sedimentconcentratie

Datum bui	Gem.gemeten hoeveelheid (g/l)	Gem.gesim. hoeveelheid (g/l)	Gemeten piek (g/l)	Gesimuleerde piek (g/l)	Pearsons coëff.
Catsop					
30-05-93	67,50	3,35	130,49	11,07*	-0,22
22-01-93	11,78	10,80	36,39	18,52	-0,77
14-10-93	24,49	10,93	31,65	32,16	-0,30
St.Gillisstraat					
31-12-93	30,66	38,85	130,61	86,73	-0,73
14-11-93	16,22	19,01	30,07	42,72	0,15
11-01-93	6,01	18,82	10,15	68,52	-0,57
22-01-93	12,00	38,38	63,10	63,52	0,27
Etzenrade					
08-06-92	6,42	0,82	21,63	2,08*	-0,29
05-07-92	8,72	10,66	11,55	21,67*	0,86

*: watermonsters tijdens de piekafvoer zijn niet genomen

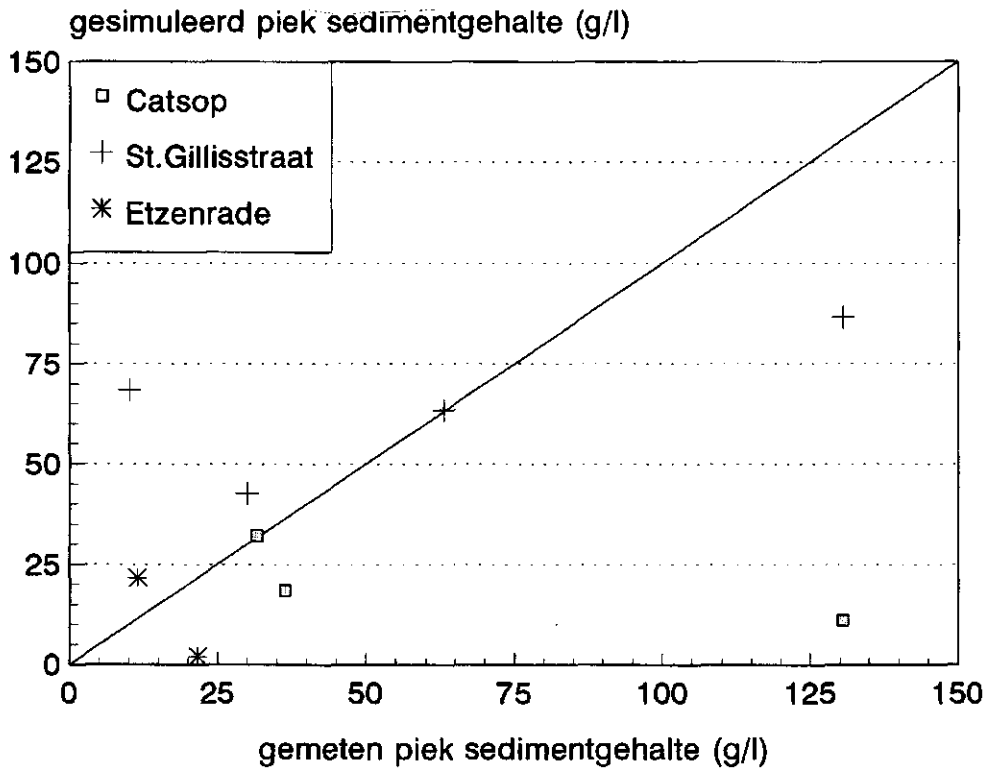


Fig. 8.10 Gemeten en met het LISEM-model gesimuleerde sedimentconcentraties van buien

8.4 Vergelijking van het LISEM- met het LID-model

Om enig inzicht te krijgen of het in de afgelopen tijd gebruikte LID-afvoermodel de berekeningsresultaten van het LISEM-model benadert, zijn de drie proefgebieden doorgerekend.

De uitgangssituatie en aannames staan beschreven in de 'Pesakerdal'-studie (zie Ruilverkaveling Mergelland, waterhuishouding I en IIa, LD 1986). De terreinberging is in het LID-model op 5 mm gesteld. Daarnaast is in het LID-model sprake van een constante infiltratiesnelheid. Voor de LISEM simulaties is scenario 0 (hoofdstuk 9), dat wil zeggen de situatie voor het in werking treden van de verordening van het Landbouwschap, in de zomer als uitgangssituatie genomen. Voor beide modellen zijn dezelfde buien gebruikt, zonder gebiedsreductie. In tabel 8.4 zijn de resultaten van beide modellen weergegeven.

Tabel 8.4 Vergelijking van het LID-afvoermodel en het LISEM-model. Voor het LISEM-model is scenario 0 in de zomer als uitgangsituatie genomen

Tot. afvoer (m^3)	T_p=5 jaar	T_p=10 jaar	T_p=25 jaar
Catsop			
LD-methode	1480	2310	3530
LISEM	2139	3244	4762
St. Gillisstraat			
LD-methode	-	2041	3370
LISEM	2085	3158	4662
Etzenrade			
LD-methode	7780	12590	19650
LISEM	6446	10757	17028

T_p = herhalingstijd van de bui.

De totale afvoeren berekend met het LISEM-model liggen voor de relatief kleine stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat respectievelijk 35-45% en 38-55% hoger dan de afvoeren berekend met het LID-model. Voor het relatief grote stroomgebied Etzenrade liggen de met het LISEM-model berekende afvoeren 15-17% lager dan de LID afvoeren. De uitgangspunten t.a.v. de afvoerberekeningen voor beide modellen verschillen dermate dat in kwantitatieve zin een vergelijking niet erg zinvol is. Wel kan gesteld worden dat de processen die bepalend zijn voor de hydrologie en erosie in het LISEM-model op een fysische wijze gesimuleerd worden. Dit betekent dat het LISEM-model per definitie betere resultaten oplevert. De meerwaarde van het LISEM-model is met name gelegen in de mogelijkheid om naast afvoervoorspellingen ook inzicht te krijgen in de intensiteit van de erosieproblematiek, het ruimtelijk patroon van waterafvoer, erosie en sedimentatie binnen een stroomgebied en de wijzigingen daarin bij een veranderend landgebruik. Vooral deze laatste aspecten maken het model uiterst geschikt om de effectiviteit van bodem- en waterconserverende maatregelen op stroomgebiedsniveau te onderzoeken.

8.5 Conclusies

Wat betreft de validatie van het LISEM-model kan het volgende geconcludeerd worden:

— het LISEM-model simuleert geen afvoer van buien als er in werkelijkheid ook geen afvoer opgetreden is;
— het LISEM-model simuleert piekafvoeren voor de gemeten buien (herhalingstijd tot 5 jaar) redelijk goed;
— de in het veld gemeten en door het LISEM-model gesimuleerde piek van het sedimentgehalte hebben dezelfde orde van grootte;
— de laterale stromingscomponent in het oorspronkelijke hellinghydrologie submodel draagt op buibasis maaar marginaal bij, waardoor in de uiteindelijke LISEM versie de laterale component is weggelaten;
— verschillen tussen gemeten en gesimuleerde afvoeren zijn vooral te verklaren door de onzekerheden in en de gevoeligheid van de doorlatendheid van de bodem en ontbrekende neerslag- en initiële drukhoogte-gegevens;

— de resultaten van het één-dimensionale hellinghydrologie sub-model zijn goed.
— het LISEM-model berekent voor de kleine stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat een 30-50% hogere afvoer, en voor het grote stroomgebied Etzenrade een 20% lagere afvoer dan het in de afgelopen tijd gebruikte LID-afvoermodel.

De resultaten van het LISEM-model bij simulaties van buien tot een herhalingstijd van 5 jaar zijn redelijk betrouwbaar. Extremere buien zijn gedurende de projectperiode niet opgetreden. Simulaties hiervan kunnen dan ook niet gevalideerd worden. Vanwege het feit dat het LISEM-model fysisch deterministisch is in plaats van empirisch, is de verwachting dat de resultaten echter ook bij het simuleren van extreme buien betrouwbaar zijn. In het algemeen moet met de gesimuleerde sedimentgehalten en bodemverliezen enige voorzichtigheid betracht worden. Deze kunnen, zeker bij de extreme bui-simulaties beter in relatieve zin geïnterpreteerd worden.

9 Scenario's ter beperking van bodemerosie en wateroverlast

9.1 Inleiding

In het kader van dit onderzoek zijn een aantal scenario's doorgerekend met betrekking tot hun effectiviteit ten aanzien van de reductie van wateroverlast en bodemerosie. Het uitgangspunt wordt gevormd door scenario 1, het huidige beleid conform het voorlopig toetsingskader. Dit scenario dient als referentie voor het bepalen van het technisch en financieel rendement van de overige scenario's. Daarnaast wordt ter vergelijking eveneens een 0-scenario doorgerekend als referentie voor de omvang van de problematiek aan het eind van de tachtiger jaren en het bepalen van de effectiviteit van het huidige beleid.

Voor de inhoud van de scenario's wordt alleen uitgegaan van actieve maatregelen die de mate van oppervlakkige afstroming en bodemerosie verminderen en waarvan de effectiviteit berekend kan worden. Dit impliceert bijvoorbeeld dat geen aandacht besteed is aan beheersmaatregelen als contourploegen (wel contourbewerken) en passieve maatregelen als beperking van de toename van het verhard oppervlak en het positief bestemmen van waterremmende landschapselementen.

De diverse scenario's zijn onderverdeeld in een drietal groepen:
— scenariogroep 0: situatie eind tachtiger jaren;
— scenariogroep 1: huidig beleid;
— scenariogroep 2: nadruk op verbeterd beheer;
— scenariogroep 3: nadruk op verbeterde inrichting;
— scenariogroep 4: nadruk op verbeterde inrichting en beheer;

9.2 Overzicht van de scenario's

Omdat ten aanzien van de verschillende teeltsystemen het meeste bekend is over maïs, is al het bouwland, exclusief de wintertarwe percelen, gesimuleerd als een maïsakker. Alleen deze oplossing maakt een verantwoorde vergelijking tussen de verschillende scenario's mogelijk. Deze aanname heeft geen verregaande consequenties omdat er een wintersitutie wordt gesimuleerd waarin op alle niet-wintertarwe percelen geen gewas groeit. Voor de 'zomer'-situatie (begin mei) heeft dit eveneens nauwelijks consequenties, aangezien er begin mei nog nauwelijks sprake is van bedekking door de gewassen, en er dus wat dat betreft geen verschillen zijn. Voor de winter betekent dit in scenario 0 dan ook dat er niet losgetrokken wordt. Op de akker bevinden zich dan nog stoppels. In de praktijk werd er echter op sommige percelen wel geploegd.

Scenario 0
Scenario 0 is het scenario waarbij uitgegaan wordt van het huidig grondgebruik echter zonder de in scenario 1 genoemde beheers- en inrichtingsmaatregelen, m.a.w. het scenario 'anno 1990'. Dit scenario dient met name om de effectiviteit van de huidige, reeds in gang gezette, bodem- en waterconserveringsmaatregelen aan te geven. Opgemerkt wordt dat er in de berekeningen voor dit scenario van wordt uitgegaan dat er in het najaar niet bewerkt wordt, hetgeen in de praktijk destijds al wel hier en daar plaatsvond.

Scenario 1
Scenario 1 - het huidige beleid - is samengesteld uit de maatregelen die opgenomen zijn in het voorlopig toetsingskader en thans ook in uitvoering zijn:

beheersmaatregelen
— grondbewerking in het najaar
— perceelslengte beperken tot 400m op hellingen van 2-5%
— perceelslengte beperken tot 300m op hellingen van 5-18%
— toepassen groenbemesters op hellingen van 10-15%
— toepassen bodembedekkers op hellingen van 15-18%
— bouwland omzetten in grasland op hellingen > 18%

inrichtingsmaatregelen
— aanleg regenwaterbuffers om resterende waterhoeveelheid te bergen

Hierbij dient opgemerkt te worden dat in de drie proefgebieden geen percelen met hellingshoeken groter dan 15% aanwezig zijn. De regenwaterbuffers zijn niet gesimuleerd. Alleen bij de uitvoering van de scenario's waar dit voorkomt is dit belangrijk.

Scenariogroep 2
Scenariogroep 2 - de verbeterde beheerscenario's - is gebaseerd op een verdere doorwerking van de resultaten van het teelttechnisch onderzoek en het demo-project. De nadruk ligt hierbij op het verbeteren van het agrarisch beheer van de gronden zonder verdergaande maatregelen te treffen in de inrichting van het landelijk gebied. De scenario's zijn zo gekozen dat ze een bandbreedte kunnen aangeven van de effecten van deze maatregelen:

beheersmaatregelen
scenario 2A
conform scenario 1, echter met:
— toepassen groenbemesters op hellingen van 2-8%
— toepassen bodembedekkers/mulchzaai op hellingen van 8-18%

scenario 2B
conform scenario 1, echter met:
— toepassen groenbemesters op hellingen van 0-2%

— toepassen bodembedekkers/mulchzaai op hellingen van 2-8%
— toepassen bodembedekkers/directzaai op hellingen van 8-18%

scenario 2C
conform scenario 1, echter met:
— toepassen groenbemesters op hellingen van 0-2%
— toepassen bodembedekkers/directzaai op hellingen van 2-18%

scenario 2D
conform scenario 1, echter met:
— toepassen van strobedekking op hellingen van 2-18%

inrichtingsmaatregelen
— aanleg regenwaterbuffers om resterende waterhoeveelheid te bergen

Scenariogroep 3
Scenariogroep 3 - de verbeterde inrichtingscenario's - omvat een aantal scenario's waarin de nadruk ligt op het realiseren van structurele maatregelen in de ruimtelijke inrichting van het gebied:

beheersmaatregelen
— conform scenario 1

inrichtingsmaatregelen
scenario 3A
— aanleg grasbanen (10 m breed) in droogdalbodems
— aanleg regenwaterbuffers om resterende hoeveelheid water te bergen
— bouwland omzetten in grasland op hellingen >15%

scenario 3B
conform scenario 3A, echter met:
— aanleg groenstroken (5 m breed) in bouwland met een onderlinge afstand van ca 200 m op hellingen van 2-15%

scenario 3C
conform scenario 3A, echter met:
— aanleg groenstroken (5 m breed) in bouwland met een onderlinge afstand van ca 100 m op hellingen van 2-5%
— aanleg groenstroken (5 m breed) met een onderlinge afstand van 200 m op hellingen > 5%. Er is geen verdichting van groenstroken op steilere hellingen doorgerekend, omdat dan via de contouren geploegd moet gaan worden. Er zijn aanwijzingen dat dit juist tot doorbraken kan leiden die tot ernstige problemen kunnen leiden.

Scenariogroep 4
Scenariogroep 4 - de integrale aanpak scenario's - omvat een aantal scenario's waarin zowel maatregelen in het verbeterde beheer als een verbeterde inrichting voorzien worden.

beheersmaatregelen
— conform scenario 1

inrichtingsmaatregelen
scenario 4A
— toepassen bodembedekkers/mulchzaai op hellingen >2%

scenario 4B
conform scenario 4A, echter met:
— aanleg grasbanen (10 m breed) in droogdalbodems
— aanleg regenwaterbuffers om resterende hoeveelheid water te bergen
— bouwland omzetten in grasland op hellingen >15%

scenario 4C
conform scenario 4B, echter met:
— aanleg groenstroken (5 m breed) in bouwland met een onderlinge afstand van ca 200 m op hellingen van 2-15%

scenario 4D
conform scenario 4B, echter met:
— aanleg groenstroken (5 m breed) in bouwland met een onderlinge afstand van ca 200 m op hellingen van 5-15%

scenario 4E
conform scenario 4B, echter met:
— toepassen bodembedekkers/mulchzaai op hellingen >5%

9.3 Uitgangspunten voor scenarioberekeningen

De diverse scenario's zijn voor twee uitgangssituaties doorgerekend. Op basis van de seizoenmatige variatie in bodembedekking, erodibiliteit, vochtgehalte etc. is van de twee volgende situaties uitgegaan:
— een situatie in begin mei, waarbij sprake is van een laag bodemvochtgehalte en een geringe gewasbedekking. In verschillende variabelen worden de effecten van groenbemesters, mulchzaai en directzaai in de voorafgaande winter- en voorjaarsperiode meegenomen;
— een situatie in december waarbij sprake is van een hoog bodemvochtgehalte en een bedekkingspercentage dat afhankelijk is van de eventuele toepassing van groenbemesters en bodembedekkers.

Deze twee uitgangssituaties zijn doorgerekend voor een tweetal neerslaggebeurtenissen:
— een bui met een herhalingstijd van 2 jaar;
— een bui met een herhalingstijd van 25 jaar.

Bij de met deze herhalingstijden corresponderende neerslaghoeveelheden en -intensiteiten wordt rekening gehouden met de verschillen (in herhalingstijd) tussen zomer- en winterhalfjaar (Heidemij, 1988) en met de grootte van het gebied. Voor de bui in mei wordt uitgegaan van een buiduur van 20 minuten met een 5 en 10 minutenperiode met hogere intensiteit, zoals zich dat in werkelijkheid voordoet. Voor de bui in december wordt uitgegaan van een buiduur van 60 minuten met een 15 en 30 minutenperiode met hogere intensiteit. De karakteristieken van de buien worden gegeven in tabel 9.1. In het rapport van de Heidemij voor het bepalen van herhalingstijden van buien wordt gewerkt met zogenaamde puntneerslagen. Voor het stroomgebied Etzenrade moet daarom vanwege zijn grootte een gebiedsreductiefactor worden toegepast. Dit omdat niet puntneerslagen maar gebiedsgemiddelden van belang zijn. Bij niet te kleine herhalingstijden zijn extremen van gebiedsgemiddelden echter kleiner dan die van puntneerslagen.

Tabel 9.1 Buikarakterisitieken voor de scenario's

WINTERBUI	herhalingstijd 2 jaar	25 jaar
tijd (min)	intensiteit (mm/h)	intensiteit (mm/h)
0.0- 15.0	3.6	6.2
15.0- 22.5	6.8	11.6
22.5- 37.5	26.0	41.2
37.5- 45.0	6.8	11.6
45.0- 60.0	3.6	6.2
60.0-100.0	0.0	0.0
totaal	10.0 mm	16.3 mm
ZOMERBUI	2 jaar	25 jaar
tijd (min)	intensiteit (mm/h)	intensiteit (mm/h)
0.0- 5.0	24.0	41.4
5.0- 7.5	30.0	58.8
7.5- 12.5	81.6	141.6
12.5- 15.0	30.0	58.8
15.0- 20.0	24.0	41.4
20.0-100.0	0.0	0.0
totaal	13.3 mm	23.6 mm

Bron: Heidemij (1988)

Extremen van gebiedsgemiddelden worden gewoonlijk uit extremen van puntneerslagen afgeleid met behulp van een gebiedsreductiefactor. Deze gebiedsreductiefactor wordt als volgt berekend (Buishand & Velds, 1980):

$$1 - ARF = 0.24\ A^{0.23}\ D^{-0.32}$$

waarbij: ARF= Areal Reduction Factor, gebiedsreductiefactor

A = het oppervlak van het stroomgebied (km^2)
D = de duur van de bui (min)

De gebiedsreductiefactor is alleen berekend voor de zomerbuien omdat voor gebieden kleiner dan 1000 km^2 bij puntextremen van het winterhalfjaar de gebiedsreductiefactor veel groter is dan voor het zomerhalfjaar en nauwelijks verschilt van 1 (Buishand & Velds, 1980). Voor gebieden kleiner dan 1000 km^2 bij puntextremen van het winterhalfjaar hoeft geen gebiedsreductiefactor toegepast te worden om gebiedsextremen te verkrijgen.
Voor het grondgebruik in de drie proefgebieden wordt uitgegaan van het landgebruik in de winter van 1991/92 en de zomer van 1992 omdat voor deze perioden alle van de voor de modelberekening benodigde parameters zijn gemeten. De veranderingen in landgebruik per scenario zijn weergegeven in aanhangsel 3.

Tabel 9.2 Modelparameters voor het berekenen van de scenario's

WINTERSCENARIO (december)										
variabele:	LAI	PER	RR	CH	AGGR	COH	COHA	N	PROF	WHEEL
grasland (1)	1,86	95,0	0,99	0,05	0,0	3,32	3,32	0,26	22	0,0
wintertarwe	0,0	0,0	1,10	0,0	15,0	1,00	0,75	0,13	1	4,8
braak (2)	0,0	15,0	0,48	0,0	15,0	1,34	0,0	0,11	18	50,0
braak (3)	0,0	1,29	0,97	0,0	15,0	0,93	0,0	0,11	15	0,0
groenbemester (4)	1,36	55,0	1,27	0,26	15,0	2,24	1,12	0,15	16	12,8
bodembedekker (5)	1,86	95,0	0,96	0,05	0,0	1,24	1,24	0,26	16	0,0
boomgaard (6)	0,57	58,0	0,73	0,78	0,0	3,01	2,80	0,23	23	0,0
ZOMERSCENARIO (begin mei)										
variabele:	LAI	PER	RR	CH	AGGR	COH	COHA	N	PROF	WHEEL
grasland	1,86	95,0	0,81	0,05	0,0	3,32	3,32	0,24	22	0,0
wintertarwe	0,72	25,0	0,71	0,22	14,0	1,00	0,75	0,10	6	4,8
snijmaïs (7)	0,0	0,0	0,71	0,0	16,7	0,49	0,12	0,08	1	22,5
mulchzaai	0,0	17	1,10	0,0	19,0	0,42	0,11	0,12	3	22,5
directzaai	0,0	30	0,52	0,0	18,5	0,94	0,24	0,06	2	22,5
strobedekking	0,0	38	0,76	0,05	13,5	0,75	0,0	0,11	4	22,5
boomgaard (6)	0,77	62,9	0,73	0,78	0,0	3,01	2,80	0,23	23	0,0

LAI = Leaf Area Index (-) COH = schuifweerstand (kPa)
PER = gewasbedekking (%) COHA = additieve schuifweerstand (kPa)
RR = bodemruwheid (cm) N = Manning's n (-)
CH = gewashoogte (m) PROF = bodemprofieltype
AGGR = aggregaatstabiliteit (-) WHEEL = breedte wielsporen (%)
(1) permanent en tijdelijk (eenjarig grasland);
(2) niet opgetrokken stoppel
(3) opgetrokken stoppel
(4) gele mosterd
(5) raaigras en rogge
(6) effekt van wielsporen zit al in de bodemfysische tabel verwerkt
(7) praktijk

De modelparameters die voor de scenarioberekeningen gebruikt zijn worden weergegeven in tabel 9.2. Niet in deze tabel is opgenomen dat voor elk onderstand landgebruik aparte tabellen met bodemfysische data worden gebruikt tijdens de simulatie. Uit de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 7) en de validatie (hoofdstuk 8)

is al gebleken dat deze tabel, met daarin de doorlatendheid van de bodem, en de initiële drukhoogte verreweg de meest gevoelige variabelen zijn. Manning's n, in tabel 9.3 aangegeven als 'N', is ook een gevoelige factor.

De variaties in de variabelen moeten mede in het licht gezien worden van de gevoeligheidsanalyse, die in hoofdstuk 7 is weergegeven. Aangezien de werkelijke onderlinge verschillen in Manning's n, Leaf Area Index en Random Roughness (bodemruwheid) veel groter zijn dan 20%, zijn deze factoren, tesamen met doorlatendheid en drukhoogte, de factoren waar het om draait. Van belang is dus met name de bedekking van het gewas en de bewerking van de bodem.

De volgende kanttekeningen kunnen gemaakt worden bij tabel 9.3:
— wintertarwe zou in de winter gesimuleerd moeten worden met 0.0% wielsporen (WHEEL), omdat de inzaai op dezelfde wijze plaatsvindt als groenbemester en bodembedekker. De simulatie van 4.8% wielsporen heeft echter geen consequenties voor de relatieve verschillen tussen de scenario's;
— de gewashoogte (CH) voor mulchzaai en directzaai is ondergewaardeerd. Van mulchzaai is de gewashoogte 0,05 m, en van directzaai iets hoger. Aangezien dit geen gevoelige variabele is, heeft deze onderwaardering niet of nauwelijks consequenties.

De breedte van groenstroken en grasbanen is respectievelijk 5 en 10 m. De ruwheidscoëfficiënt van deze groenstroken en grasbanen is op basis van de veldmetingen gesteld op 0,416. Locaties van de groenstroken en grasbanen zijn op een kaart aangegeven (Fig. 9.1). Deze ligging is afhankelijk van aanwezige landschapselementen, ligging van stroombanen en percelering:
— Grasbanen liggen in de dalbodems. De beginpositie is daar waar het oppervlak van het achterliggend gebied, dat voornamelijk als bouwland of laagstamboomgaard in gebruik is, een waarde van 5 ha overschrijdt. De eindpositie is het punt waar deze grasbaan een als 'channel' gedefinieerd pixel bereikt. De grasbanen zijn als ononderbroken elementen weergegeven en doorgerekend. Dus ook daar waar een grasbaan door een thans als grasland in gebruik zijnd perceel heengaat;
— Groenstroken liggen parallel aan de hoogtelijnen. De onderlinge afstand bedraagt 100, c.q. 200 m. De meest hellingopwaarts gelegen strook is gepositioneerd op een afstand van gemiddeld ca. 200 m vanaf de bovenzijde van het hoogst gelegen bouwlandperceel vanaf de waterscheiding in dat perceel. De positie van de overige stroken (gemiddeld om de ca. 200 m) is hiervan afgeleid. Bij de positionering van de stroken is zoveel mogelijk rekening gehouden met het aansluiten op reeds aanwezige elementen als graften of heggen.

De totale lengte en het totale oppervlak van de groenstroken en grasbanen is weergegeven in tabel 9.3.

Tabel 9.3 De totale lengte en oppervlakte van groenstroken en grasbanen.

	Catsop	St. Gillisstraat	Etzenrade[1]
scenario 3A en 4B			
grasbaan (m) (m^2)	550 (5500)	860 (8600)	500 (5000) 160 (1600)
scenario 3B en 4C			
grasbaan (m) (m^2)	550 (5500)	860 (8600)	500 (5000) 160 (1600)
groenstroken (m) (m^2)	183 (915)	131 (655)	380 (1900) 294 (1470)
scenario 3C			
grasbaan (m) (m^2)	550 (5500)	860 (8600)	500 (5000)
groenstrook (m) (m^2)	256 (1280)	214 (1070)	930 (4650)

[1] In Etzenrade zijn ook berekeningen uitgevoerd met minder grasbanen en groenstroken (H 10).

De resultaten van de scenarioberekeningen zijn beschreven in het hierna volgende hoofdstuk.

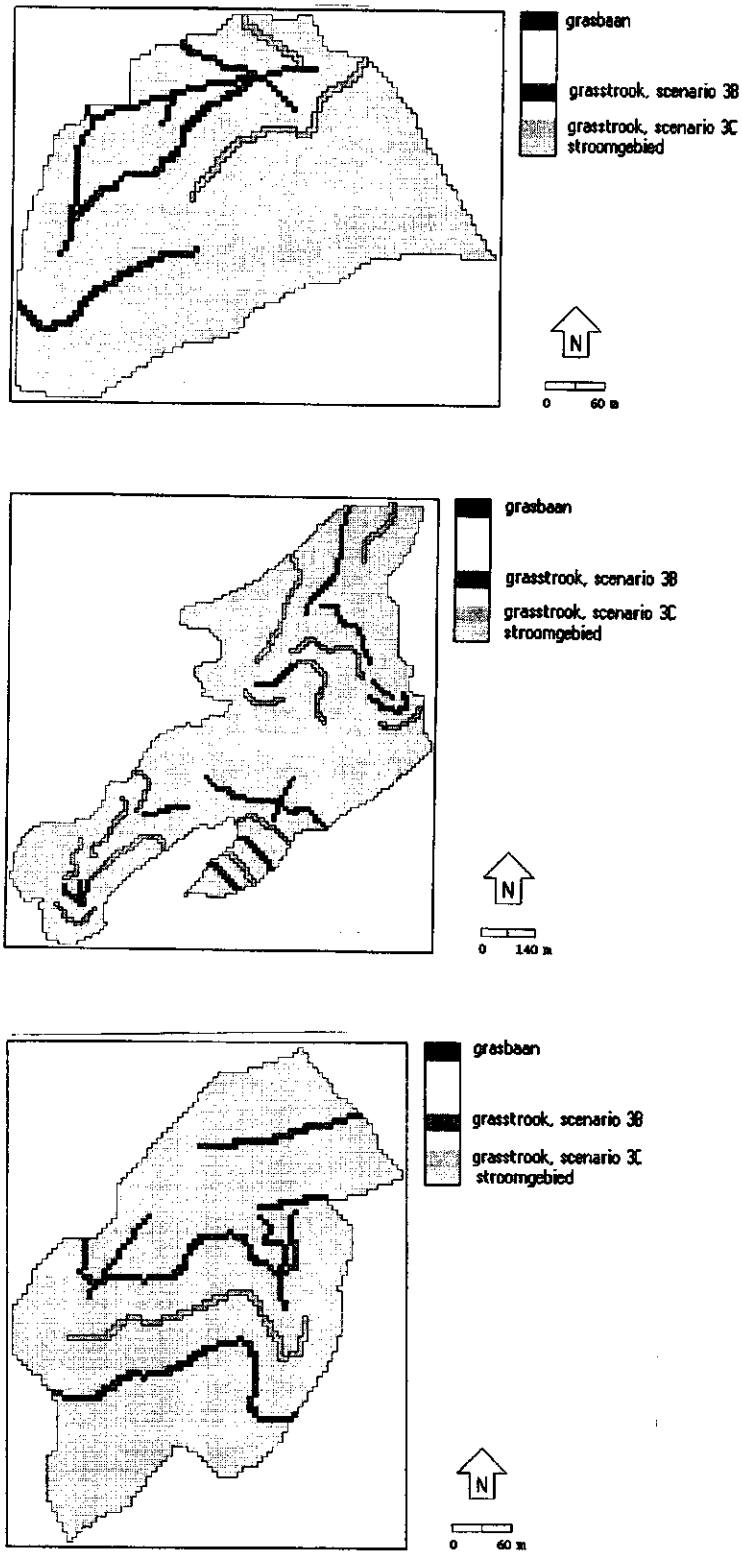


Fig. 9.1 Ligging grasbanen en groenstroken in de stroomgebieden

10 Resultaten scenarioberekeningen

10.1 Inleiding

Gezien het feit dat de bodemerosie- en wateroverlast problematiek op twee schaalniveaus speelt, namelijk het lokale niveau van de akkers en het 'regionale' niveau van de (sub)stroomgebieden, worden ook de toetsingscriteria op twee niveaus voorgesteld.

Het lokale niveau van de akkers:
— aantal en omvang locaties met meer dan een gemiddeld bodemverlies. Locaties met een bodemverlies van meer dan 5 ton/ha en 10 ton/ha zijn bepaald;
— aantal en omvang van locaties met meer dan gemiddelde sedimentatie. Locaties met een hoeveelheid sedimentatie van meer dan 10 ton/ha en 50 ton/ha zijn bepaald.

Het regionale niveau van de (sub)stroomgebieden:
— de totale afvoer per bui (m^3 en m^3/km^2);
— de piekafvoer (l/s);
— de netto hoeveelheid bodemverlies per stroomgebied (bodemerosie minus sedimentatie) als maat voor de modderoverlast (kg/ha).

Opgemerkt wordt dat een 25-jaars neerslag simulatie niet vergeleken kan worden met een 25-jaars afvoergebeurtenis. Een 25-jaars neerslag valt meestal in een relatief klein gebied (< 1 km^2). Een 25-jaars neerslag gesimuleerd in een groter gebied geeft een afvoer met een herhalingstijd die veel groter is dan 25 jaar. Dit is vooral van toepassing in het stroomgebied Etzenrade dat 2,2 km^2 groot is.

10.2 Resultaten

De resultaten zijn weergegeven in de tabellen 10.1 t/m 10.8. Tabel 10.1 en 10.2 geven een totaal overzicht van de on-site en off-site effecten van de diverse scenario's. Tabel 10.3 t/m 10.5 beschrijven de 'off-site' effecten van de erosie- en wateroverlastproblematiek: ze beschrijven de totale effecten. Tabel 10.6 t/m 10.8 beschrijven de 'on-site' effecten en geven een beeld van de verplaatsing van sediment binnen de stroomgebieden. In figuur 10.1 t/m 10.6 zijn de resultaten van de scenario-berekeningen voor het stroomgebied St. Gillisstraat relatief weergegeven.
Uit de scenario berekeningen blijkt dat scenario 1 (huidig beleid) in de winter aanzienlijk minder waterafvoer (31-71%) en bodemverlies (16-85%) geeft dan scenario 0 (situatie 1990). In de zomer verschillen deze twee scenario's niet. Op de percelen is door het huidige beleid de erosie in de winter afgenomen en de sedimentatie in het algemeen toegenomen.

Tabel 10.1 'Off-site' effecten van de scenario's in de stroomgebieden: Reductiepercentages t.o.v. scenario 1, het huidige beleid

scenario	totale afvoer		piek afvoer		bodemverlies	
	winter	zomer	winter	zomer	winter	zomer
0*	**31-71**	**0**	**25-70**	**0**	**16-85**	**0**
1	-	-	-	-	-	-
2A	20-63	0-56	22-74	0-58	0-87	0-83
2B	6-61	13-62	10-74	23-63	0-78	17-82
2C	6-61	6-41	10-74	7-50	0-78	0-72
2D	0	23-84	0	32-85	0	22-98
3A	1-23	5-29	0-35	0-49	10-44	2-54
3B	0-31	18-41	0-46	19-61	13-90	9-81
3C	0-33	19-47	0-48	24-65	13-94	16-96
4A	6-31	21-72	9-45	28-72	0-77	15-92
4B	14-45	24-77	18-60	23-86	0-84	11-91
4C	0-47	30-78	9-62	51-83	0-93	47-95
4D**	32-44	43-78	47-50	70-83	80-89	82-94
4E	0-37	0-66	0-51	0-75	0-80	0-58

* reducties van scenario 1 ten opzichte van scenario 0; geeft het effect aan van het huidige beleid ten opzichte van de situatie rond 1990.

** alleen berekend in stroomgebied St. Gillisstraat

Tabel 10.2 'On-site' effecten van de scenario's in de stroomgebieden: de oppervlakten met extreme netto erosie of sedimentatie. Reductiepercentages t.o.v. scenario 1, het huidige beleid

scenario	erosie				sedimentatie			
	> 5 ton/ha		> 10 ton/ha		> 10 ton/ha		> 50 ton/ha(*)	
	winter	zomer	winter	zomer	winter	zomer	winter	zomer
0**	18-42	0	19- 45	0	**60**- 42	0	**100- 60**	0
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2A	11-86	0-31	12- 91	0-30	**9**-100	**37**- 0	25-100	**67**- 20
2B	33-93	5-36	32- 91	6-46	22-100	**22**-27	42-100	**17**- 50
2C	33-93	**8**-21	32- 91	**8**-23	22-100	9-36	42-100	7- 50
2D	0	18-64	0	13-70	0	**11**-64	0	7-100
3A	0	0	0	0	0- 22	0-13	**50**- 17	**10**- 11
3B	0-33	0-27	**5**- 31	0-28	0- 33	**9**-27	**100**- 17	**13**- 25
3C	0-43	0-50	**5**- 50	**4**-46	0- 50	**5**-55	**100**- 33	**17**- 50
4A	30-93	13-43	28- 91	13-48	26-100	**14**-36	42-100	**33**- 75
4B	39-93	8-43	24- 91	8-46	50-100	**22**-36	42-100	**17**- 75
4C	39-93	18-62	38-100	17-62	57-100	**11**-55	50-100	**33**- 75
4D***	39-93	11-50	38- 91	8-48	30-100	**17**- **5**	50-100	**22**- **17**
4E	0-79	0-27	0- 82	0-26	**11**- 83	**26**- 5	**50**-100	**17**- 0

* de omvang van locaties met meer dan 50 ton/ha sedimentatie per bui is meestal gering. In verband met afronding en celgrootte dienen de reductiepercentages in deze kolom dan ook met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden;

** reducties van scenario 1 ten opzichte van scenario 0; geeft het effect aan van het huidige beleid ten opzichte van de situatie rond 1990;

*** alleen berekend in stroomgebied St. Gillisstraat.

60 Negatieve reductie, m.a.w. toename (met name bij de sedimentatie)

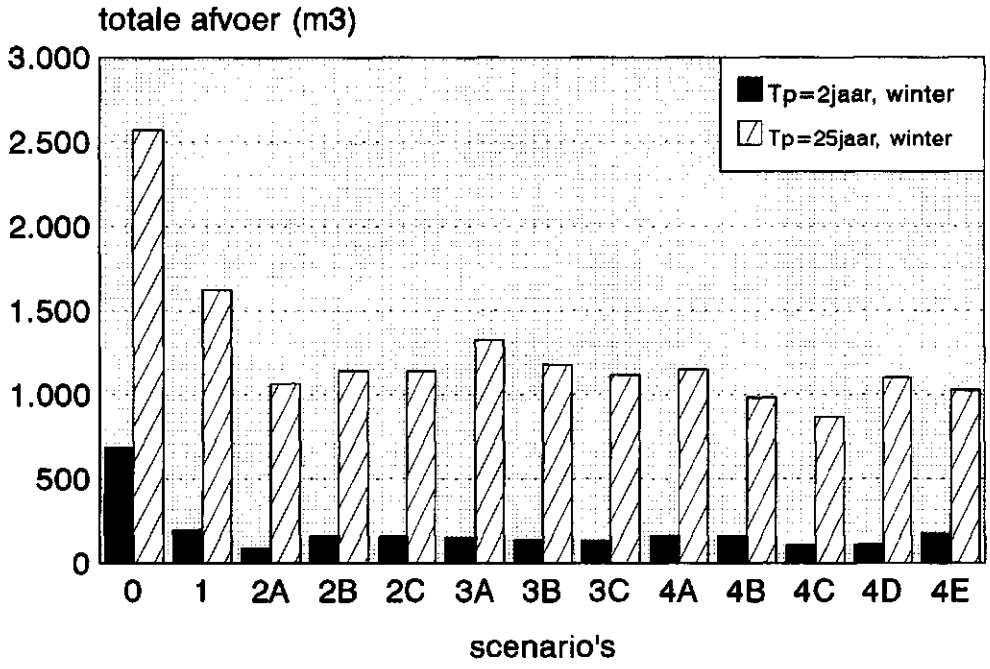


Fig. 10.1 Totale afvoer (m3) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

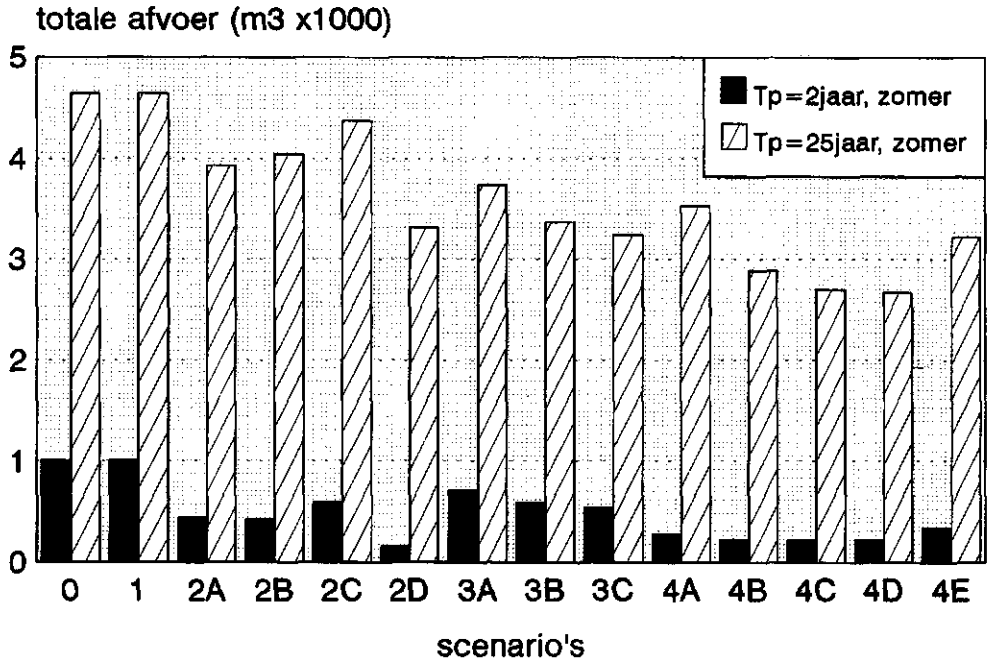


Fig. 10.2 Totale afvoer (m3) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

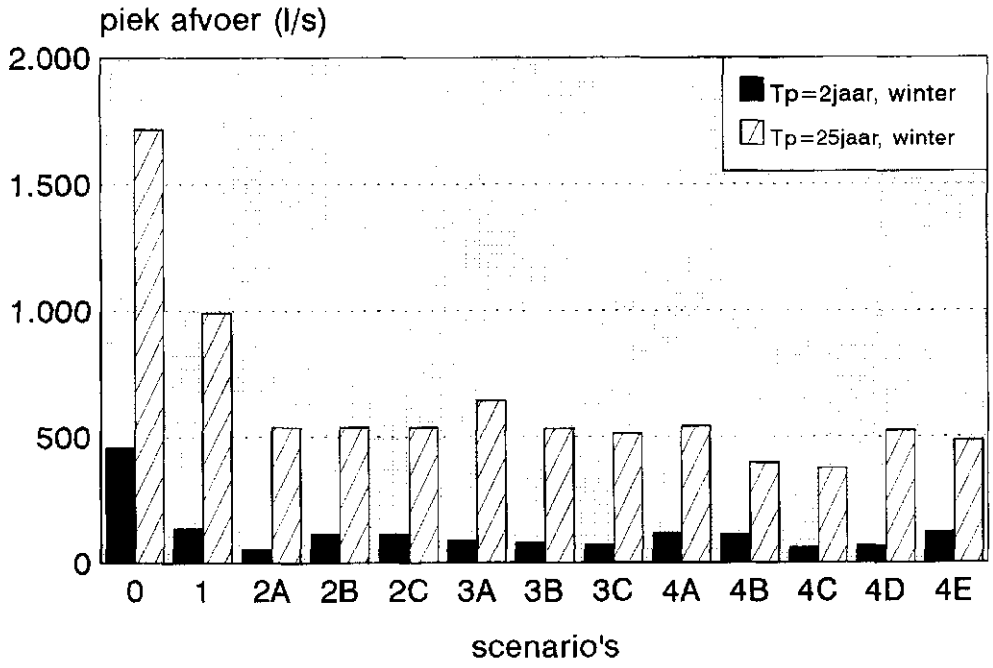


Fig. 10.3 Piek afvoer (l/s) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

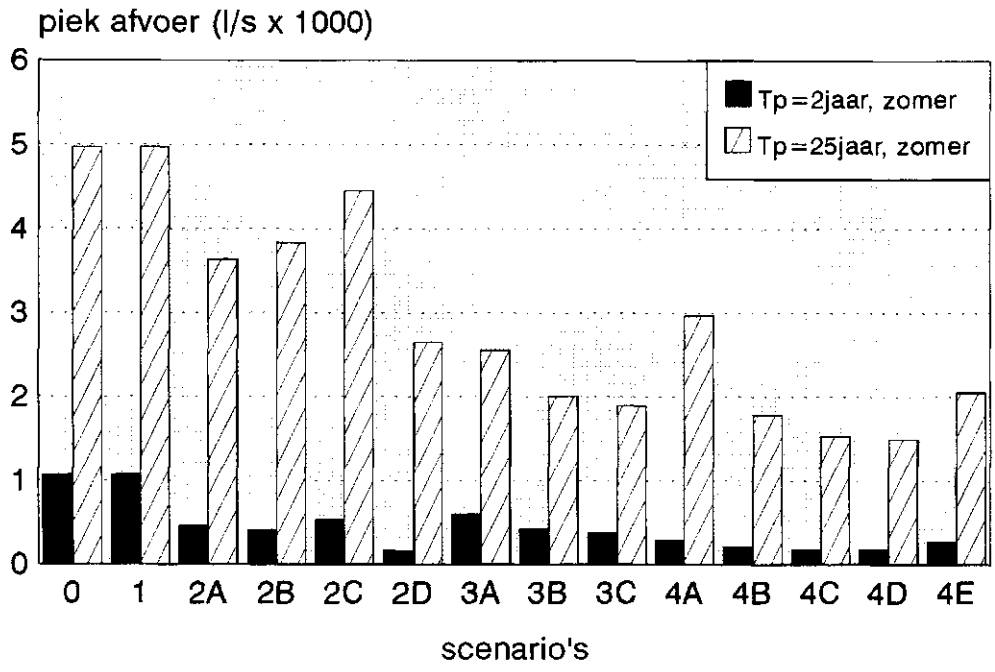


Fig. 10.4 Piek afvoer (l/s) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

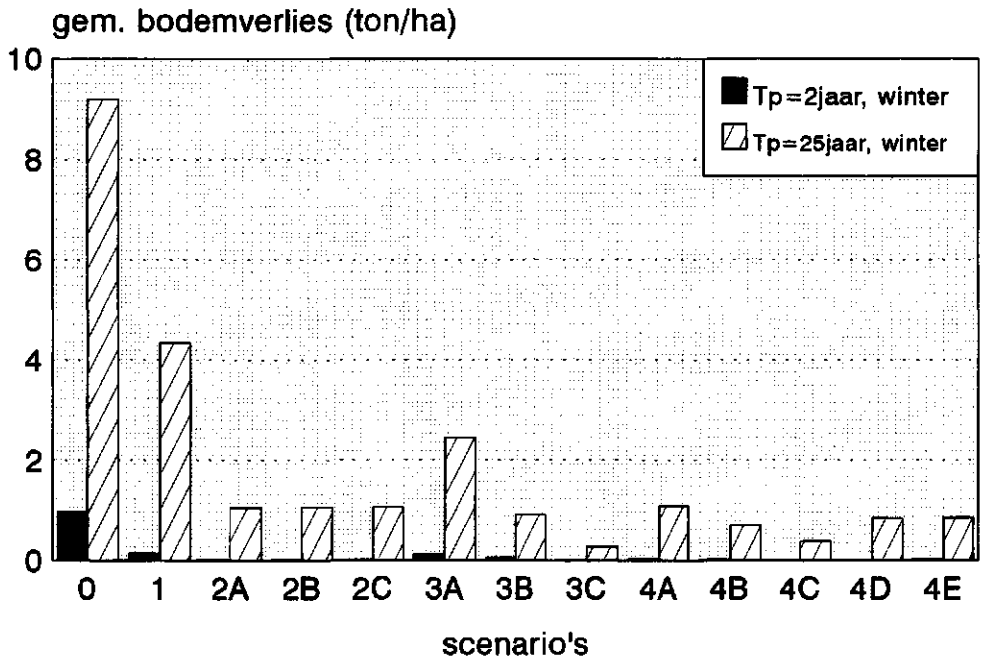


Fig. 10.5 Bodemverlies (kg/ha) voor diverse winter scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

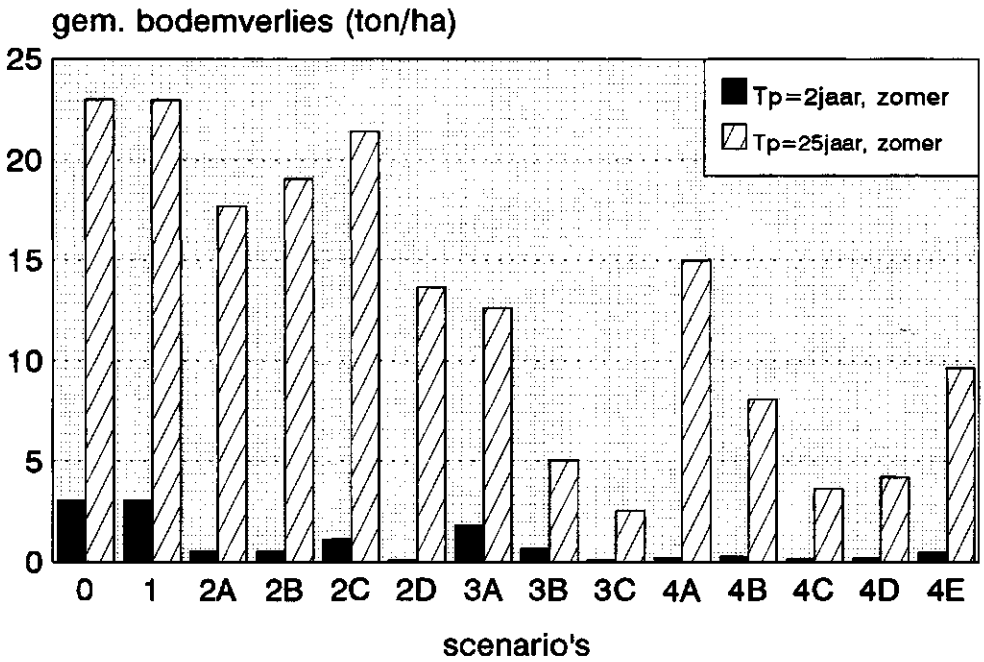


Fig. 10.6 Bodemverlies (kg/ha) voor diverse zomer scenario's in het stroomgebied St. Gillisstraat

Tabel 10.3 Totale effecten van de scenario's in het stroomgebied Catsop

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	472,59	263,16	23,20	1137
1	161,03	105,36	19,39	387
2A	113,29	71,33	21,30	273
2B	150,94	94,98	25,09	363
2C	150,94	94,98	25,09	363
2D	161,03	105,36	19,39	387
3A	149,95	92,28	17,51	361
3B	183,35	107,87	16,83	441
3C	183,42	106,14	16,91	441
4A	151,54	96,30	25,10	365
4B	138,48	81,35	22,54	333
4C	171,24	96,25	20,49	412
4D	-	-	-	-
4E	171,90	105,78	17,65	414
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	2355,03	1477,08	465,32	5667
1	1504,69	853,28	115,48	3621
2A	1210,01	665,66	45,17	2911
2B	1222,08	637,66	47,54	2941
2C	1222,08	637,66	47,54	2941
2D	1504,69	853,28	115,48	3621
3A	1489,92	860,74	74,62	3585
3B	1510,21	838,08	11,64	3634
3C	1522,16	838,25	11,64	3663
4A	1212,81	628,49	43,09	2918
4B	1207,95	590,61	17,94	2907
4C	1360,40	687,39	23,05	3273
4D	-	-	-	-
4E	1598,14	928,97	109,61	3845
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	943,10	713,72	73,98	2269
1	943,10	713,72	73,98	2269
2A	928,33	699,74	69,29	2234
2B	355,25	269,26	17,05	855
2C	710,00	527,15	20,71	1708
2D	269,27	220,96	16,79	648
3A	849,19	734,30	33,75	2043
3B	713,74	575,36	14,31	1717
3C	689,25	539,26	14,74	1658
4A	354,16	271,64	17,17	852
4B	320,41	229,15	15,14	771
4C	370,66	293,00	14,57	892
4D	-		-	-
4E	842,00	730,07	31,91	2025
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	4745,18	4809,90	1321,31	11418
1	4745,18	4809,90	1321,31	11418
2A	4724,44	4786,67	1315,59	11368
2B	3760,86	3104,56	978,40	9049
2C	4479,60	4468,23	1334,72	10779
2D	3661,44	2928,23	1036,38	8810
3A	4496,88	4208,02	1290,33	10820
3B	3892,80	2826,24	1197,35	9367
3C	3858,52	2730,53	1104,45	9284

Vervolg tabel 10.3

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
4A	3761,55	3156,62	983,36	9051
4B	3614,21	3126,69	1003,52	8696
4C	3312,41	2341,03	695,20	7970
4D	-	-	-	-
4E	4487,93	4213,31	1268,46	10799

Tabel 10.4 Totale effecten van de scenario's St. Gillisstraat

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	684,99	456,92	982,68	1601
1	195,75	135,36	141,01	457
2A	87,52	52,39	18,27	205
2B	158,04	115,15	31,29	369
2C	158,04	115,15	31,29	369
2D	195,75	135,36	141,01	457
3A	149,68	91,58	126,68	350
3B	135,95	79,71	57,25	318
3C	131,27	70,79	12,39	307
4A	161,92	118,13	32,52	378
4B	162,33	111,47	31,35	379
4C	104,63	59,73	9,94	245
4D	109,21	67,33	14,99	255
4E	173,15	122,90	38,46	405
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	2568,87	1714,96	9194,23	6003
1	1623,59	991,95	4336,59	3794
2A	1064,54	537,16	1056,25	2488
2B	1141,58	536,01	1062,02	2668
2C	1141,58	536,01	1062,02	2668
2D	1623,59	991,95	4336,59	3794
3A	1326,17	642,01	2449,60	3099
3B	1177,95	531,88	920,42	2753
3C	1117,14	511,98	281,15	2610
4A	1149,75	541,14	1079,78	2686
4B	894,94	396,55	701,77	2091
4C	867,95	373,90	388,26	2049
4D	1100,44	522,78	847,77	2572
4E	1026,89	483,52	860,88	2400
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	1003,13	1069,68	3027,62	2344
1	1003,13	1069,68	3027,62	2344
2A	440,72	451,31	528,72	1030
2B	419,93	401,29	554,13	981
2C	591,20	529,55	1138,84	1382
2D	159,62	157,23	69,27	373
3A	713,62	599,57	1824,80	1667
3B	590,34	421,89	669,21	1380
3C	536,17	371,96	131,26	1253

Vervolg tabel 10.4

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
4A	282,17	298,46	235,56	659
4B	225,50	205,56	282,70	527
4C	221,23	181,63	141,34	517
4D	217,53	179,18	195,39	508
4E	340,01	267,57	489,61	795
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	4644,87	4973,49	22961,66	10855
1	4644,87	4973,49	22961,66	10855
2A	3929,60	3631,63	17718,24	9183
2B	4038,60	3838,77	19070,90	9438
2C	4372,44	4450,18	21393,26	10218
2D	3320,04	2650,68	13662,35	10834
3A	3742,50	2552,00	12632,14	8746
3B	3369,40	2003,71	5065,85	7874
3C	3244,13	1893,92	2545,12	7582
4A	3528,99	2968,89	15043,18	8247
4B	2893,74	1784,85	8082,54	6763
4C	2702,39	1526,94	3642,02	6315
4D	2672,26	1493,59	4225,74	6245
4E	3223,01	2046,05	9660,17	7532

Tabel 10.5 Totale effecten van de scenario's Etzenrade.

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	3079,70	1204,51	266,21	1373
1	1021,46	486,48	38,66	455
2A	373,23	128,47	14,93	166
2B	401,29	127,83	17,66	179
2C	401,29	127,83	17,66	179
2D	1021,46	486,48	38,66	455
3A	****,**	***,**	**,**	***
3B	****,**	***,**	**,**	***
3C	****,**	***,**	**,**	***
4A	701,66	291,71	31,57	313
4B	****,**	***,**	**,**	***
4C	****,**	***,**	**,**	***
4D	-	-	-	-
4E	****,**	***,**	**,**	***
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	11783,69	3794,34	386,54	5252
1	8180,24	2854,64	298,77	3646
2A	4033,61	1269,47	138,96	1798
2B	5413,26	1827,44	308,18	2413
2C	5413,26	1827,44	308,18	2413
2D	8180,24	2854,64	298,77	3646
3A	****,**	***,**	**,**	***
3B	****,**	***,**	**,**	***
3C	****,**	***,**	**,**	***

Vervolg tabel 10.5

Scenario	totale afvoer (m^3)	piek afvoer (l/s)	gemiddeld bodemverlies (kg/ha)	totale afvoer (m^3/km^2)
4A	6040,64	2014,93	330,20	2692
4B	****,**	***,**	**,**	***
4C	****,**	***,**	**,**	***
4D	-	-	-	-
4E	****,**	***,**	**,**	***
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	3016,63	2070,97	298,54	1345
1	3016,63	2070,97	298,54	1345
2A	2953,93	2030,74	287,15	1317
2B	1239,21	768,45	74,50	552
2C	1841,20	1168,15	192,91	821
2D	731,19	429,37	42,34	326
3A	****,**	***,**	**,**	***
3B	****,**	***,**	**,**	***
3C	****,**	***,**	**,**	***
4A	1130,96	664,40	50,88	504
4B	****,**	***,**	**,**	***
4C	****,**	***,**	**,**	***
4D	-	-	-	-
4E	****,**	***,**	**,**	***
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	17081,52	9172,40	907,09	7613
1	17081,52	9172,40	907,09	7613
2A	17005,83	9136,64	873,43	7580
2B	12773,37	6699,03	756,20	5693
2C	15809,94	8273,01	793,88	7047
2D	11993,58	6212,82	719,52	5345
3A	****,**	***,**	**,**	***
3B	****,**	***,**	**,**	***
3C	****,**	***,**	**,**	***
4A	12179,91	6616,85	767,57	5429
4B	***12139,79***	***6603,96***	***761,31***	***5411***
4C	***11958,08***	***6130,07***	***543,45***	***5330***
4D	-	-	-	-
4E	***16899,23***	***9175,88***	***933,93***	***7532***

Tabel 10.6 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied Catsop

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	18	20	20	6
1	13	18	15	2
2A	10	13	12	1
2B	7	7	8	1
2C	7	7	8	1
2D	13	18	15	2
3A	13	18	15	3
3B	9	12	10	2
3C	8	12	9	2

Vervolg tabel 10.6

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
4A	7	7	8	1
4B	7	7	8	1
4C	5	5	6	1
4D	-	-	-	-
4E	14	20	16	3
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	31	23	33	11
1	25	30	27	12
2A	22	27	24	9
2B	17	16	18	7
2C	17	16	18	7
2D	25	30	27	12
3A	27	29	28	12
3B	19	20	20	10
3C	17	20	18	10
4A	18	15	19	7
4B	19	15	20	7
4C	14	13	15	6
4D	-	-	-	-
4E	28	30	30	13
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	29	22	33	10
1	29	22	33	10
2A	28	22	32	10
2B	21	24	23	8
2C	26	19	29	8
2D	17	18	20	5
3A	30	21	34	11
3B	21	16	24	8
3C	18	16	20	7
4A	21	25	24	7
4B	22	25	25	8
4C	16	17	18	6
4D	-	-	-	-
4E	31	21	35	11
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	45	23	47	15
1	45	23	47	15
2A	45	23	47	15
2B	38	28	40	15
2C	45	21	49	14
2D	39	22	42	14
3A	47	22	49	16
3B	36	25	38	17
3C	31	22	33	16
4A	39	28	41	15
4B	41	27	42	16
4C	32	24	34	15
4D	-	-	-	-
4E	48	22	50	16

Tabel 10.7 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied St. Gillisstraat

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	20	13	24	6
1	11	12	14	1
2A	1	0	2	0
2B	1	0	1	0
2C	1	0	1	0
2D	11	12	14	1
3A	11	11	14	1
3B	11	12	14	1
3C	11	12	14	1
4A	1	0	1	0
4B	1	0	1	0
4C	0	0	1	0
4D	1	0	1	0
4E	2	2	3	0
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	31	12	33	5
1	21	23	23	8
2A	12	25	14	4
2B	12	18	13	4
2C	12	18	13	4
2D	21	23	23	8
3A	23	18	24	7
3B	22	19	23	7
3C	22	20	23	7
4A	13	17	14	4
4B	16	8	18	4
4C	13	7	14	4
4D	13	16	14	4
4E	19	11	21	6
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	23	23	26	6
1	23	23	26	6
2A	16	31	18	10
2B	19	19	22	7
2C	18	20	21	5
2D	7	19	10	3
3A	23	20	26	6
3B	23	21	26	6
3C	24	22	26	7
4A	12	30	15	8
4B	13	28	16	7
4C	9	22	10	4
4D	12	27	13	7
4E	17	29	19	7
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	36	19	38	9
1	36	19	38	9
2A	32	26	33	10
2B	34	15	36	8
2C	39	13	41	6
2D	29	21	31	8
3A	36	18	38	8
3B	36	19	37	9
3C	35	20	37	10

Vervolg tabel 10.7

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
4A	28	26	29	11
4B	33	21	35	10
4C	30	21	31	12
4D	33	20	34	11
4E	38	20	39	10

Tabel 10.8 Erosie en sedimentatie binnen het stroomgebied Etzenrade

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
Winter, herhalingstijd 2 jaar				
0	9	8	10	3
1	6	8	7	0
2A	3	6	4	0
2B	2	2	2	0
2C	2	2	2	0
2D	6	8	7	0
3A	*	*	*	*
3B	*	*	*	*
3C	*	*	*	*
4A	2	1	3	0
4B	*	*	*	*
4C	*	*	*	*
4D	-	-	-	-
4E	*	*	*	*
Winter, herhalingstijd 25 jaar				
0	16	10	16	6
1	13	16	13	6
2A	9	10	9	3
2B	7	5	7	2
2C	7	5	7	2
2D	13	16	13	6
3A	*	*	*	*
3B	*	*	*	*
3C	*	*	*	*
4A	7	5	8	3
4B	*	*	*	*
4C	*	*	*	*
4D	-	-	-	-
4E	*	*	*	*
Zomer, herhalingstijd 2 jaar				
0	13	11	14	4
1	13	11	14	4
2A	12	12	14	4
2B	7	8	9	2
2C	10	7	11	2
2D	4	4	5	0
3A	*	*	*	*
3B	*	*	*	*
3C	*	*	*	*

Vervolg tabel 10.8

Scenario	>10 tn/ha erosie (%)	>10 tn/ha sedimentatie (%)	>5 tn/ha erosie (%)	>50 ton/ha sedimentatie (%)
4A	7	7	8	1
4B	*	*	*	*
4C	*	*	*	*
4D	-	-	-	-
4E	*	*	*	*
Zomer, herhalingstijd 25 jaar				
0	23	16	24	10
1	23	16	24	10
2A	23	16	18	8
2B	17	16	18	8
2C	24	14	25	9
2D	18	14	19	7
3A	*	*	*	*
3B	*	*	*	*
3C	*	*	*	*
4A	17	18	18	8
4B	*17*	*18*	*18*	*8*
4C	*15*	*14*	*15*	*7*
4D	-	-	-	-
4E	*23*	*17*	*24*	*10*

Scenario 2A (groenbemesters/mulchzaai) beperkt de waterafvoer en erosie in de winter tussen de 10 en 70% ten opzichte van scenario 1. In de zomer is dit scenario alleen in het stroomgebied St. Gillisstraat effectief (vanwege de steilere hellingen) en beperkt de waterafvoer en het bodemverlies met 50-80% tijdens een 2-jaars bui en met 15-25% tijdens een 25-jaars bui. De erosie op de percelen neemt af, in de winter relatief meer dan in de zomer. Sedimentatie neemt afwisselend toe of af op de percelen, afhankelijk van het type bui, het seizoen of het gebied.
Scenario 2B (groenbemesters/mulchzaai/directzaai) vermindert de waterafvoer met 10-60% in alle gebieden. Uitzondering hierop vormt de 25-jaars bui in de zomer, die slechts 10-35% reductie in de waterafvoer oplevert. Ten aanzien van het bodemverlies geldt hetzelfde beeld: 50-80% reductie, met uitzondering van de 25-jaars bui in de zomer, die 15-25% minder bodemverlies geeft. Op de percelen is de afname van de erosie groter dan bij scenario 2A.
Scenario 2C (groenbemesters/directzaai) levert in de winter dezelfde resultaten op als scenario 2B. In de zomer reduceert dit scenario de waterafvoer en het bodemverlies minder dan scenario 2B. Bij een 2-jaars zomerbui is de reductie van de waterafvoer 20-40% (was 60% in 2B), en de reductie van het bodemverlies 35-70% (was 60-80%). Bij een 25-jaars zomerbui is de reductie van de waterafvoer 5-10% (was 10-35% in 2B), en de reductie van het bodemverlies 0-10% (was 15-25%). Op de percelen neemt de erosie in de zomer minder af dan bij scenario 2B
Scenario 2D (strobedekking), dat alleen in de zomer verschilt van scenario 1, reduceert de piekafvoer met 70-85% en het bodemverlies met 77-98% gedurende een 2-jaars bui. Gedurende een 25-jaars bui is de reductie minder groot: respectievelijk 30-50% reductie van de piekafvoer, en 20-40% reductie van het bodemverlies. Op de percelen reduceert dit scenario in de zomer de erosie het meest van de groep 2 scenario's.

Scenario 3A (grasbanen) geeft een reductie van de piekafvoer van 30-50% in het stroomgebied St. Gillisstraat, en 12% reductie in Catsop. Het bodemverlies wordt met 10-50% gereduceerd ten opzichte van het huidige beleid. Vanzelfsprekend is hierbij de totale lengte en de ligging van de grasbanen een belangrijke factor. In het stroomgebied St. Gillisstraat, waar relatief met de grootste lengte grasbanen is gesimuleerd, trad de grootste reductie op. Voor de erosie op de percelen heeft dit scenario geen effect ten opzichte van scenario 1. In de praktijk zal alleen erosie op de plaats van de grasbanen worden tegengegaan.
Scenario 3B (groenstroken + grasbanen) levert in het stroomgebied St. Gillisstraat een nog verdere reductie op van de piekafvoer tot 40-55% en van het bodemverlies van 50-65%. Op de percelen vindt op veel plaatsen reductie van erosie op. Op enkele plaatsen kan de erosie ook relatief toenemen: het oppervlakkig afstromend water heeft sediment op de groenstrook neergelegd en kan hellingafwaarts de bodem opnieuw eroderen. Door de remmende werking van de groenstrook op de snelheid van het water is het netto-effect echter sediment-reductie.
Scenario 3C (groenstroken + grasbanen) beperkt de afvoer, de piekafvoer, het totale bodemverlies en de erosie op de percelen in sterkere mate dan scenario 3B.
Scenario 4A (bodembedekkers/mulchzaai >2%) levert voor zomerbuien betere resultaten op dan de scenario's 2A,2B en 2C. Voor winterbuien zijn de groep 2 scenario's effectiever. Dit scenario geeft betere resultaten dan alle groep 3 scenario's.
Scenario 4B (bodembedekkers/mulchzaai >2%+grasbanen) levert betere resultaten op dan scenario 4A, vooral wat betreft de reductie van de waterafvoer. De hoeveelheid erosie en sedimentatie op de percelen als gevolg van scenario 4B verschilt niet van 4A.
Scenario 4C (mulchzaai, grasbanen en groenstroken) reduceert de waterafvoer enkele procenten meer dan scenario 4B. De totale hoeveelheid bodemverlies en de erosie op de percelen worden sterker dan de waterafvoer gereduceerd ten opzichte van scenario 4B.
Scenario 4D (mulchzaai, grasbanen en groenstroken) is alleen van toepassing in het stroomgebied St. Gillisstraat. Vooral in de zomer is dit scenario minder gunstig dan scenario 4C, vooral wat betreft de erosie op de percelen.
Scenario 4E (bodembedekkers/mulchzaai >5%+grasbanen) levert aanzienlijk minder reductie op van afvoer en erosie dan de overige groep 4 scenario's.

In het stroomgebied Etzenrade en Catsop levert de simulatie van groenstroken een instabiel resultaat op. De verklaring van de instabiliteit is dat het LISEM-model op en direct achter een groenstrook een nieuwe snelheid uitrekent op basis van de waterhoogte en Manning's n, die groter is op een groenstrook, zoals gemeten. Door de snelheidsvertraging die optreedt op een groenstrook blijft er meer water achter waardoor deze laag dikker wordt. Het model rekent vervolgens in sommige gevallen uiteindelijk juist een hogere snelheid uit (door de dikkere waterlaag), hetgeen onjuist is. Het probleem blijkt niet opgelost te kunnen worden door een kortere simulatie-tijdstap (5 i.p.v. 15 sec) te nemen, maar zou mogelijk opgelost kunnen worden door de kinematic wave te vervangen door een dynamic wave benadering. Er is hier gekozen voor een oplossing waarbij over een zone van 100 m onder een groenstrook een geleidelijke afname van de Manning's n is gesimuleerd tot de Manning waarde die geldt op het perceel onder de groenstrook.

Desondanks leverden de simulaties van groenstroken in het stroomgebied Etzenrade na deze aanpassing nog steeds geen correcte simulaties op. Indien benedenstrooms van de groenstroken op betrekkelijk korte afstand (< 50 m) verhard oppervlak voorkomt, dat tevens als 'channel' fungeert, blijkt de correctiemethode niet toereikend te zijn. Na extra simulaties met groenstroken op grotere afstand (minimaal 50 m) van het verharde oppervlak blijkt deze oplossing wel te voldoen (zie vet/cursief in tabel 10.5 en 10.8). Het is daarom raadzaam bij het gebruik van het LISEM-model de groenstroken op minimaal 50 m afstand van verhard oppervlak te simuleren. Vanzelfsprekend kan bij eventuele aanleg van groenstroken wel voor een kortere afstand gekozen worden: er is puur sprake van een simulatie-probleem.

10.3 Conclusies

Algemeen

De landbouwkundige maatregelen binnen het voorlopig toetsingskader, doorgerekend als scenario 1, geven een vermindering van de piekafvoer, de totale waterafvoer, en zowel de totale bodemerosie en de sedimentatie in de wintersituatie als erosie en sedimentatie op de percelen, maar hebben geen invloed op de zomersituatie.
Alle scenario's uit groep 2, 3 en 4 hebben in meer of mindere mate invloed op de waterafvoer en bodemerosie, met uitzondering van het stro-scenario (2D) in de winter, dat dan niet verschilt van scenario 1.

Beheersscenario's

In de wintersituaties leveren de scenario's 2B en 2C de minste afvoer, erosie en sedimentatie. In de zomersituatie levert scenario 2D (stro-bedekking) de minste afvoer, erosie en sedimentatie. Dit beeld is consistent in de drie verschillende proefgebieden.

Inrichtingsscenario's

Gedurende zomer en winter verminderen grasbanen (scenario 3A), mits goed aangelegd in de dalbodem, de totale afvoer en de piekafvoer en het totale bodemverlies. Ook dit beeld is consistent in de drie verschillende proefgebieden. Dit scenario heeft geen effect op erosie en sedimentatie op de percelen. De effecten beperken zich tot de grasbaan zelf.
De aanleg van gras- dan wel groenstroken op de hellingen (scenario 3B) levert nog eens een extra reductie op van het totale bodemverlies. Dit is echter via de scenario's alleen aan te tonen in de stroomgebieden St. Gillisstraat en Catsop, omdat de simulatie van groenstroken met het LISEM-model in de stroomgebieden Etzenrade tot numerieke problemen leidt. Een verdere verdichting van groenstroken op de hellingen (scenario 3C) leidt tot een verdere afname van het bodemverlies en de afvoer. Vooral erosie en sedimentatie op de percelen nemen hier verder af.

Gecombineerde beheers- en inrichtingsscenario's

Het toepassen van mulchzaai op percelen die gemiddeld steiler zijn dan 2% (scenario 4A) is vooral in de zomer effectiever dan alle beheersscenario's uit groep 2. Worden er in combinatie met deze vorm van mulchzaai tevens grasbanen aangelegd (scenario 4B), dan wordt vooral de waterafvoer verder gereduceerd. In vergelijking met scenario 1 komen reducties tot 80% in de zomer voor. Op de percelen verandert er in vergelijking met scenario 4A niets. De bodemerosie wordt in de zomer tot maximaal circa 45% teruggebracht en tot maximaal 90% in de winter.

Indien er naast mulchzaai en grasbanen ook groenstroken worden aangelegd (scenario 4C) dan treedt er vooral een reductie van het bodemverlies, en dan met name erosie op de percelen, op. De bodemerosie wordt in de zomer dan tot maximaal 60% en in de winter tot maximaal 100% teruggebracht. Indien de aanleg van groenstroken beperkt wordt tot de percelen die gemiddeld steiler zijn dan 5%, worden vooral het totale bodemverlies en de erosie op de percelen minder beperkt dan als gevolg van scenario 4C. De verschillen in waterafvoer tussen scenario 4C en 4D zijn minder groot. Het beperken van het toepassen van mulchzaai tot percelen gemiddeld steiler dan 5% in combinatie met de aanleg van grasbanen (scenario 4E) is minder effectief dan de overige gecombineerde beheers- en inrichtingsscenario's.

11 Conclusies en aanbevelingen

Algemeen
Bodemerosie en wateroverlast zijn milieuproblemen die zich voordoen in het heuvelland van Zuid-Limburg. Duidelijk zichtbare erosie treedt op in bouwland bij stortbuien met name in het voorjaar, waarbij een deel van de neerslag over het nog vrijwel onbedekte oppervlak afstroomt en bodemdeeltjes meeneemt. Minder zichtbaar, maar op de lange termijn een grote bedreiging voor de dikte en dus het voortbrengend vermogen van de bodem is de erosie van bodemdeeltjes bij meer frequente, maar minder intensieve buien in najaar, winter en voorjaar.

In de periode 1991-1994 is het erosienormeringsonderzoek verricht. Doelstelling van dit onderzoek was om aan te geven waar welke maatregelen genomen dienen te worden om de problematiek van bodemerosie en wateroverlast tot een maatschappelijk aanvaardbaar niveau terug te dringen. Het maatschappelijk aanvaardbaar niveau wordt daarbij bepaald in afweging tussen de effectiviteit en kosten van maatregelen. In dit kader wordt parallel aan de afronding van het erosienormeringsonderzoek een kosten-baten analyse voor de diverse erosiebestrijdingsmaatregelen uitgevoerd.

Opzet van het onderzoek
Gezien het feit dat de gevolgen van bodemerosie en wateroverlast zich globaal gezien op een drietal schaalniveau's in het landschap manifesteren is er in het erosienormeringsonderzoek ook op drie schaalniveau's onderzoek verricht:
a) het perceelsniveau, waarop met name de effecten van het wegspoelen van bodemdeeltjes, zaaigoed en gewassen van belang zijn;
b) het hellingniveau, waarop naast bovengenoemde zaken ook de effecten van slibafzetting in de lager gelegen delen van het landschap een rol spelen;
c) het stroomgebiedsniveau waarop naast genoemde effecten met name de water- en modderoverlast in de bebouwde kommen kenmerkend zijn (off-site schade).

In het kader van dit onderzoek zijn metingen van bodemverlies en waterafvoer op deze drie niveau's uitgevoerd. Daarbij is een simulatiemodel (het LISEM-model) ontwikkeld, getoetst en toegepast in een drietal proefgebieden (ca 40 - 200 ha). Dit model berekent wat er tijdens en direct na een regenbui gebeurt in een stroomgebied ten aanzien van oppervlakkige afstroming, bodemerosie en sedimentatie. Tevens beschrijft het de beweging van water in de bovenste zone van de bodem. Middels een dergelijk model is het ook mogelijk om uitspraken te doen over effecten van wijzigingen in landgebruik en over effectiviteit van maatregelen gedurende incidentele, extreme neerslaggebeurtenissen.

In het onderzoek heeft tevens een integratie plaatsgevonden van de resultaten van het in 1985-1993 op de proefboerderij Wijnandsrade uitgevoerde onderzoek naar de effectiviteit en opbrengst van teelttechnische erosiebestrijdingsmaatregelen; dit onderzoek vond plaats op kleine proefvelden (ca 200 m2). Tenslotte zijn ook de resultaten van het Demonstratieproject erosiebestrijdende teeltsystemen in

beschouwing genomen; dit project was met name gericht op de technische uitvoerbaarheid en opbrengsten op praktijkniveau van de aan de proefboerderij ontwikkelde teeltsystemen.

Omvang en intensiteit van de problematiek
De veldstudie heeft een integraal beeld opgeleverd over het mechanisme van water- en sedimentafvoer in de lössgebieden van Zuid-Limburg. Een verdere inventarisatie van de omvang van de erosieproblematiek op regionaal niveau heeft in het kader van het erosienormeringsonderzoek niet plaatsgevonden. De metingen op de diverse schaalniveau's: proefveld, helling, substroomgebied en stroomgebied hebben in deze context veel informatie opgeleverd. Met name is meer inzicht verkregen in het watertransport in de bodem gedurende en na neerslaggebeurtenissen. Geconstateerd werd dat de (ruimtelijke) verschillen in bodemfysische eigenschappen van de toplaag van de bodem bepalend zijn in het proces van oppervlakkige afstroming in het lössgebied. Deze verschillen worden sterker bepaald door de teeltsystemen en hun invloed op verslemping en structuur van de toplaag dan door bodemfactoren, zoals textuur en organische stofgehalte.

Uit de metingen blijkt dat er in de winter oppervlakkige afvoer optreedt tijdens en na buien van een zekere omvang: variaties in het vochtgehalte van de bodem voor de bui, dat in de winter altijd hoog is, bepalen of al bij enkele millimeters neerslag afvoer ontstaat of dat er meer neerslag nodig is om afvoer te genereren. Zelfs bij lage neerslagintensiteiten kan er al oppervlakkige afstroming optreden. Indien de akkers in de winter een geringe bedekking hebben, zal er bij oppervlakkige afstroming van water vrijwel altijd in meer of mindere mate erosie optreden.

In de zomer is het vooral de intensiteit van de neerslag die belangrijk is in relatie tot de infiltratie-eigenschappen van de bodem. Indien er een hoge intensiteit bui valt op een nauwelijks of niet begroeide bodem zal er zowel oppervlakkige afstroming als bodemerosie optreden. De lage bedekkingsgraad van de gewassen, alsmede de hogere erosiegevoeligheid van de bodem in die periode spelen een belangrijke rol. Voor een juiste interpretatie van de gegevens is het van belang om te stellen dat de conclusies t.a.v. de wintergebeurtenissen als respresentatief gezien kunnen worden voor de periode oktober-maart. Voor de zomergebeurtenissen betreft het de periode in het voorjaar: half april - begin juni.

Ontwikkeling en gebruik van het LISEM-model
De meetresultaten uit de veldstudies (stroomgebieden; substroomgebieden; teeltsystemen; groenstroken) hebben geleid tot de ontwikkeling van een nieuw hydrologisch en bodemerosiemodel: LISEM (LImburg Soil Erosion Model). Dit model berekent o.m. de hoeveelheid afstromend water en de erosie bij het huidig landgebruik en diverse scenario's voor een alternatief landgebruik (beheers- en/of inrichtingsmaatregelen). Het model is fysisch deterministisch. Dat maakt het ook geschikt voor gebruik buiten de proefgebieden (en dus ook buiten Limburg). Hier dient men dan wel over de gegevens voor het relatief grote aantal invoervariabelen te beschikken. De beschikbaarheid van gegevens om betrouwbare simulaties uit te voeren is een bekend probleem. Na twee en een half jaar intensief meten in het kader van dit project blijkt dat de hoeveelheid beschikbare gegevens weliswaar toereikend,

maar niet bijzonder groot is. Voor het lössgebied van Zuid-Limburg en zijn directe omgeving zijn voor een groot aantal invoervariabelen standaardtabellen opgesteld, die in de modelhandleiding zijn vermeld.

Het LISEM-model is, zoals alle modellen, een benadering van de werkelijkheid. Alleen de belangrijkste processen zijn nagebootst.

De validatie van het model heeft plaatsgevonden op een vergelijking van gemeten en gesimuleerde afvoerhoeveelheden, piekafvoeren en sedimentconcentraties. Het model blijkt onder de aanwezige omstandigheden redelijk betrouwbare afvoervoorspellingen te geven. De mate van betrouwbaarheid wordt echter sterk bepaald door de beschikbare kennis of het gebrek aan kennis ten aanzien van de ruimtelijke variabiliteit in doorlatendheid van de bodem, het bodemvochtgehalte en de oppervlakteruwheid.

De resultaten van het LISEM-model zijn redelijk betrouwbaar bij simulaties van buien tot een herhalingstijd van 5 jaar. Extremere buien zijn gedurende de onderzoeksperiode niet in de proefgebieden opgetreden. Simulaties van deze buien kunnen dan ook niet op hun waarde getoetst worden. Vanwege het feit dat het LISEM-model fysisch deterministisch is in plaats van empirisch, is de verwachting dat de reken-resultaten van extreme buien redelijk betrouwbaar zijn, mits de ruimtelijke en temporele verdeling van de neerslag en de doorlatendheid van de bodem goed bekend zijn. Meer metingen zijn nodig om deze verwachting te onderbouwen.

In het algemeen zijn de resultaten van het erosie deel van het model minder betrouwbaar dan van het hydrologische deel, hoewel de in het veld gemeten en door het LISEM-model gesimuleerde piek van het sedimentgehalte dezelfde orde van grootte hebben. Met de gesimuleerde sedimentgehalten en bodemverliezen dient dan ook enige voorzichtigheid betracht worden. Deze resultaten kunnen, zeker bij extreme buien, beter in relatieve zin geïnterpreteerd worden.

Voor een drietal buien met een herhalingstijd van 5, 10 en 25 jaar heft een vergelijking plaatsgevonden van de met het LISEM-model gesimuleerde en met het afvoermodel van de Landinrichtingsdienst berekende waterafvoer in de drie proefgebieden. De totale afvoeren berekend met het LISEM-model liggen voor de stroomgebieden Catsop en St. Gillisstraat ca 40 - 50% hoger dan de afvoeren berekend met het model van de Landinrichtingsdienst. Voor het stroomgebied Etzenrade liggen de met het LISEM-model berekende afvoeren ca 15% lager dan de afvoeren berekend met het model van de Landinrichtingsdienst. De uitgangspunten t.a.v. de afvoerberekeningen voor beide modellen verschillen dermate dat in kwantitatieve zin een vergelijking niet erg zinvol is. Wel kan gesteld worden dat de processen die bepalend zijn voor de hydrologie en erosie in het LISEM-model op een fysische wijze gesimuleerd worden. Dit betekent dat het LISEM-model per definitie betere resultaten oplevert. De meerwaarde van het LISEM-model is met name gelegen in de mogelijkheid om naast afvoervoorspellingen ook inzicht te krijgen in de intensiteit van de erosieproblematiek, het ruimtelijk patroon van waterafvoer, erosie en sedimentatie binnen een stroomgebied en de wijzigingen daarin bij een veranderend landgebruik. Vooral deze laatste aspecten maken het model uiterst

geschikt om de effectiviteit van bodem- en waterconserverende maatregelen op stroomgebiedsniveau te onderzoeken.

Bij de in het onderzoek uitgevoerde modelberekeningen is onderscheid gemaakt tussen relatief frequente buien met een herhalingstijd van 2 jaar en incidentele buien met een herhalingstijd van 25 jaar. Op deze wijze kan de effectiviteit van de diverse maatregelen bezien worden vanuit twee invalshoeken:

- duurzaamheid; het zoveel mogelijk instandhouden van het voortbrengend vermogen van de bodem; speelt op perceelsniveau;
- het terugdringen van de overlast, met name op stroomgebiedsniveau.

Teelttechnische maatregelen

Resultaten van het veldonderzoek aan de proefboerderij Wijnandsrade en het demonstratieproject tonen aan dat waterafvoer en bodemverlies gedurende de winterperiode aanzienlijk beperkt worden door een najaarsbewerking. Dit verwijdert de wielsporen, verhoogt de infiltratie en zorgt voor een hoge bodemruwheid waardoor veel water aan het oppervlak geborgen wordt. Inzaai van een bodembedekker veroorzaakt een geringe extra reductie van de erosie in deze periode. De aanwezigheid van een wielspoor heeft veel waterafvoer en bodemverlies tot gevolg.

Gedurende het groeiseizoen wordt de waterafvoer en het bodemverlies het sterkst gereduceerd door het opbrengen van stro na de inzaai van het hoofdgewas. Hieromtrent zijn echter geen resultaten op praktijkniveau beschikbaar. Daarnaast reduceert directzaai in een bodembedekker de waterafvoer en het bodemverlies in sterke mate: resp. 50-80% en ca 80 - 95% op perceelsniveau. Het positieve effect van directzaai op infiltratie van regenwater hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de bodem vanaf de inzaai van de bodembedekker in het najaar de tijd krijgt voor structuurontwikkeling. Hierbij spelen de wortels van de bodembedekker en het bodemleven een belangrijke rol. Daarnaast spelen de resten van de bodembedekker een belangrijke rol in de reductie van het bodemverlies samenhangend met een grotere bescherming van het bodemoppervlak, een verhoging van de oppervlakteruwheid en een hoge (micro)biologische activiteit in de bodem.

De metingen van waterafvoer en bodemverlies op de demonstratiepercelen waarop mulchzaai toegepast wordt, leiden niet tot eenduidige conclusies t.a.v. effectiviteit. Dit hangt o.m. samen met de biomassa van het wintergewas, het vochtgehalte van de boden, en de stabiliteit van de bodemstructuur. Op de proefvelden met geringe hellinglengte is wel duidelijke beperking van het bodemverlies gemeten, maar niet van de waterafvoer, welke soms juist groter is. Het is de verwachting dat hierdoor bij langere hellingen erosie mogelijk blijft.

Veldonderzoek uit dit onderzoek heeft aangetoond dat het erosiegevaar op kleefaardepercelen beduidend lager is dan op lössgronden, zowel in de winterperiode als gedurende het groeiseizoen. Zelfs op een zeer steile en lange helling trad nauwelijks erosie op. Teeltsystemen als directzaai en mulchzaai hebben hier geen aantoonbaar erosiebeperkend effect.

Het model-onderzoek heeft aangetoond dat het uitvoeren van teelttechnische maatregelen conform de erosieverordening van het Landbouwschap (scenario 1) de waterafvoer en het bodemverlies in de drie proefgebieden in de winter reduceert met resp. 70% en 80% t.o.v. de situatie zonder deze maatregelen (scenario 0) bij buien met een herhalingstijd van 2 jaar. Bij buien met een herhalingstijd van 25 jaar bedraagt de reductie in de winter resp. ca 35 en 50%. Op de percelen is door het huidige beleid de erosie in de winter afgenomen en de sedimentatie in het algemeen toegenomen (minder off-site schade).

De maatregelen zoals opgenomen in de verordening van het Landbouwschap hebben geen effect op de waterafvoer en het bodemverlies in de zomer. Bij buien met gelijke herhalingstijd is de waterafvoer en het bodemverlies voor een zomerbui echter ca 2-5 maal zo hoog als voor een winterbui.

Tevens dient de kanttekening geplaatst te worden dat maatregelen die cf. de erosieverordening op percelen met hellingshoeken groter dan 15% getroffen dienen te worden, niet in het modelonderzoek zijn meegenomen omdat dergelijke steile hellingen ontbreken in de proefgebieden (zie: leemten in onderzoek). Aanvullende bescherming dient dan ook met name gezocht te worden in maatregelen die effectief zijn in de zomerperiode. In feite de periode half april - begin juni, wanneer de gewasbedekking nog gering is, de erosiegevoeligheid hoog en er intensieve buien kunnen optreden.

De modelresultaten bevestigen het positieve effect van de toepassing van bodembedekkers op stroomgebiedsniveau, zij het dat de effectiviteit in het algemeen lager is dan op perceelsniveau. Toepassing van mulchzaai en groenbemesters op hellingen >2% (scenario 2A) beperkt de waterafvoer en het bodemverlies gedurende het groeiseizoen met ca 5% t.o.v. de praktijksituatie (scenario 1). Alleen in het gebied St. Gillisstraat wordt een hogere effectiviteit berekend. Toepassing van mulchzaai en directzaai op hellingen steiler dan 2% (scenario 2B/C) leidt op stroomgebiedsniveau tot een aanzienlijke reductie van de waterafvoer en het bodemverlies gedurende het groeiseizoen. Bij 2-jaarsbuien resp: 20-60% en 40-80%; bij 25-jaarsbuien voor beide factoren ca 5-20%. Modelmatig is er geen duidelijk onderscheid tussen mulch- en directzaai. De genoemde veldgegevens geven hiertoe een betere indicatie en vormen een betere basis voor een afweging tussen direct- en mulchzaai.

In de zomersituatie beperkt het scenario 'strobedekking' het meest de afvoer, erosie en sedimentatie. Bij de hoge effectiviteit van het toepassen van strobedekking dienen enige kanttekeningen geplaatst te worden. De gegevens zijn verkregen uit proefveldonderzoek waarbij het stro met de hand is opgebracht. Voor praktijktoepassing dient van machinaal opbrengen uitgegaan te worden hetgeen onvermijdelijk gepaard zal gaan met spoorvorming en dientengevolge een verminderde effectiviteit voor wat betreft de reductie van oppervlakkige afstroming en bodemerosie.

Inrichtingsmaatregelen
Voor wat betreft inrichtingsmaatregelen zijn slechts op beperkte schaal veldmetingen uitgevoerd naar de effectiviteit van groenstroken. Het beperkt aantal metingen en de voor dit aspect uitgevoerde literatuurstudie hebben aangetoond dat gras een duidelijke sedimentfilterende werking heeft, die afhankelijk is van de breedte van de strook en de hoeveelheid aangevoerd slib. De eerste meters van de strook vangen reeds het grootste deel van het sediment in: 50-60% reductie bij een 1 m brede strook, 60-90% reductie bij een 4-5 m brede strook en 90-99% reductie bij een 10 m brede strook. Het effect op de waterafvoer is echter minder duidelijk: groenstroken beïnvloeden de stroomsnelheid van het water in sterke mate indien het water als een dunnne laag door het gras stroomt. Indien het gras geheel onder water komt te staan is de effectiviteit geringer. Bij geconcentreerde waterstroming is er kans op overstroming over de stroken, waardoor deze niet meer effectief fungeren voor wat betreft hun waterremmende en sedimentfilterende eigenschappen. Dit kan voorkomen worden door enerzijds de afvoer uit het tussenliggende bouwland te beperken en anderzijds door de stroken zo goed mogelijk de hoogtelijnen te laten volgen.

De modelresultaten tonen aan dat de aanleg van 10 m brede grasbanen in de dalbodems (scenario 3A) de totale afvoer, de piekafvoer en het totale bodemverlies beperkt zowel gedurende zomer als winter. Dit beeld is consistent in de drie proefgebieden: 10-20% reductie in de waterafvoer en 10-50% reductie in het bodemverlies. Deze reductiepercentages zijn in dezelfde orde van grootte voor frequente en incidentele buien. Dit scenario heeft geen effect op erosie en sedimentatie in de percelen. De effecten beperken zich tot verminderde erosie in de grasbaan zelf.

De aanleg van 5 m brede groenstroken op hellingen in aanvulling op grasbanen in de dalbodems (scenario 3B) leidt tot een hogere effectiviteit: 2-25% reductie in de waterafvoer en ca 30-80% reductie van het bodemverlies. Dit leidt eveneens tot een afname van de erosie en sedimentatie op de percelen. Een grotere verdichting van de groenstroken op de hellingen (scenario 3C) leidt wel tot een verdere afname van het bodemverlies, maar vrijwel niet tot een verder afname van de waterafvoer.

Voor wat betreft de effecten van groenstroken zijn de resultaten van het proefgebied Etzenrade slechts beperkt beschikbaar als gevolg van problemen met de modellering van het afvoerproces in groenstroken. Dit probleem is wel praktisch, maar nog niet fysisch opgelost.

De in dit onderzoek bestudeerde scenario's leiden niet tot een 100% reductie van de waterafvoer. Regenwaterbuffers worden in deze onderzoeksopzet gezien als het sluitstuk van de bodem- en waterconservering, d.w.z. de capaciteit van de regenwaterbuffers is omgekeerd evenredig met de effectiviteit van de overige maatregelen.

Combinaties van maatregelen
Het bovenstaande toonde aan dat gedurende hoog-frequente (herhalingstijd: 0 - 5 jaar) neerslaggebeurtenissen teelttechnische maatregelen het meest effectief zijn; gedurende laag-frequente neerslaggebeurtenissen (herhalingstijd > 25 jaar) zijn de inrichtingsmaatregelen het meest effectief. Een combinatie van beheers- en inrichtingsmaatregelen geeft dan ook de beste resultaten. Het toepassen van mulchzaai op percelen die gemiddeld steiler zijn dan 2% (scenario 4A) is vooral in de zomer effectiever dan alle overige beheersscenario's uit groep 2. Worden er in combinatie met deze vorm van mulchzaai tevens grasbanen aangelegd (scenario 4B), dan wordt vooral de waterafvoer verder gereduceerd. In vergelijking met scenario 1 komen reducties tot 80% in de zomer voor. Op de percelen verandert er in vergelijking met scenario 4A niets. De bodemerosie wordt in de zomer tot maximaal ca 45% teruggebracht en tot maximaal 90% in de winter. Het effect van dit scenario is groter dan de afzonderlijke effecten van de beide scenario's waaruit het is samengesteld: 3A en 2B. Indien er naast mulchzaai en grasbanen ook groenstroken worden aangelegd (scenario 4C) dan treedt er vooral een reductie van het bodemverlies en dan met name erosie op de percelen, op. De bodemerosie wordt in de zomer dan tot maximaal 60% en in de winter tot maximaal 100% teruggebracht.
Indien de aanleg van groenstroken beperkt wordt tot de percelen die gemiddeld steiler zijn dan 5%, (scenario 4D) worden vooral het totale bodemverlies en de erosie op de percelen minder beperkt dan als gevolg van scenario 4C. De verschillen in waterafvoer tussen scenario 4C en 4D zijn minder groot.

Het beperken van het toepassen van mulchzaai tot percelen gemiddeld steiler dan 5% in combinatie met de aanleg van grasbanen (scenario 4E) is minder effectief dan de overige combinatiescenario's.

In bovenstaande scenario's is steeds uitgegaan van de toepassing van mulchzaai.

Leemten in onderzoek
Bij de opzet van het onderzoek bleek het niet mogelijk om een aantal aspecten in de uitvoering mee te nemen.
- maatregelen op hellingen > 15%.

In de proefgebieden die voor wat betreft de combinatie van landgebruik, bodemtype en hellingklassen als representatief voor Zuid-Limburg worden gezien, zijn geen percelen met hellingen steiler dan 15% aanwezig. Er kan dan ook geen uitspraak gedaan worden over de effectiviteit van maatregelen op percelen met hellingshoeken groter dan 15%. Een globale analyse van de hellingklassengegevens voor de landbouwschapsverordening toont aan dat minder dan 1% van het bouwlandoppervlak in Zuid-Limburg gelegen is op percelen steiler dan 15%.
- effecten van verharding.

De onderzochte maatregelen hebben vooral betrekking op maatregelen in de agrarische percelen en de aanleg van regenwaterbuffers. Lokaal kan de erosieproblematiek het gevolg zijn van afstroming van water vanuit verharde terreinen en wegen naar landbouwgronden. Deze aspecten zijn gezien hun sterk lokale aard, niet in het onderzoek meegenomen. Het is echter duidelijk dat in dergelijke situaties aanpak van deze problemen (vaak door gemeenten) noodzakelijk is om de effectiviteit

van de overige maatregelen ten volle te benutten en een reductie van de problematiek van erosie en wateroverlast te bewerkstelligen.

- effecten van bossen

In de bestudeerde proefgebieden zijn geen bossen aanwezig. De effecten van bossen op het patroon van waterafvoer zijn dan ook niet meegenomen. In de modelhandleiding wordt hierop wel ingegaan.

Aanbevelingen

Naar aanleiding van dit onderzoek wordt aanbevolen om de neerslag-, afvoer en sedimentlastmetingen op stroomgebiedsniveau gedurende langere tijd te continueren om zodoende de effecten van een groot aantal buien met wisselende herhalingstijden te kunnen waarnemen. Op deze wijze kunnen ook modelberekeningen van laagfrequente neerslaggebeurtenissen gevalideerd worden. Daarbij wordt tevens aanbevolen om de ruimtelijke verdeling van de waterdoorlatendheid van de bodem in meer detail te onderzoeken teneinde de betrouwbaarheid van de modelresultaten verder te vergroten.

Voor validatie van de modelresultaten en het verwerven van inzicht in de praktijktoepassing van bodem-en waterconserverende maatregelen wordt aanbevolen om in geselecteerde (sub)stroomgebieden een of meer scenario's op zo kort mogelijke termijn uit te voeren. Gezien de veldsituatie en de scenario-resultaten lijken hiertoe scenario 4A t/m 4D in het stroomgebied St. Gillisstraat het meest geschikt. Een verdere keuze kan gemaakt worden na het beschikbaar komen van de resultaten van de kosten/baten-analyse. In nauw overleg met grondgebruikers zou een projectplan opgesteld kunnen worden.

Gezien de positieve resultaten van het aanbrengen van stro op proefveldniveau wordt aanbevolen om deze maatregel ook op praktijkschaal te onderzoeken. Daarbij dient met name aandacht besteed te worden aan (de nog niet onderzochte) effecten van het machinaal opbrengen van stro en het gedrag van stro bij evt. oppervlakkige afstroming.

De aanleg van grasbanen en groenstroken is nog niet op praktijkschaal onderzocht. Aanbevolen wordt om groenstroken zo nauwkeurig mogelijk langs de hoogtelijnen te leggen teneinde zijdelingse afstroming langs en doorbraak over de groenstroken te voorkomen. Voor grasbanen is het van belang dat zij de natuurlijke stroomrichting in het laagste punt van de droogdalbodem volgen en dat eventuele sedimentatie op de grasbanen niet leidt tot afstroming van water in de aan weerszijden van de grasbaan gelegen percelen.

Ten aanzien van de verdere ontwikkeling van het LISEM-model wordt aanbevolen om de instabiliteitsproblemen van het model bij de simulatie van groenstroken op fysische wijze op te lossen.

Literatuur

Allmaras, R.R., R.E. Burwell, W.E. Larson & R.F. Holt, 1966. *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage.* USDA Conservation Research Report No.7.

Arends, A.M. 1993. *Een ondiepe geschiedenis: een onderzoek naar de bodemfysische eigenschappen van de bovengrond ten behoeve van het erosienormeringsproject.* Interne mededeling 271. DLO-Staring centrum. Wageningen

Aston, A.R. (1979), 'Rainfall Interception by eight small trees'. *Journal of Hydrology,* Vol.42, 383-396.

Bakker, J.W. 1975. *Tensiometers, materialen en reactiesnelheden van systemen.* ICW rapport 847. DLO-Staring Centrum. Wageningen

Bannink, M.H. en J.H.M. Wösten, 1988. 'Vochttransport tussen wortelzone en grondwaterspiegel'. *Landinrichting* 1988/28 1:23-28

Beasley, D.B. & L.F. Huggins (1982), *ANSWERS Users manual. USEPA, Region V, Chicago, Illinois.* Purdue University, West Lafayette, IN., 54 pp.

Belmans, C., J.G. Wesseling & R.A. Feddes (1983), 'Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE'. *Journal of hydrology,*Vol.63, 271-286.

Bergsma, E & C.R. Valenzuela, 1981. 'Drop testing aggregate stability of some soils near Merida, Spain'. *Earth surface processes and landforms 6* (309-318).

Boekel, P., 1966. *Verbetering van de structuur van de bovengrond.* Ministerie van Landbouw en Visserij, no 13 (1-7).

Boels, D., J.B.H.M. van Gils, G.J. Veerman and K.E. Wit. 1978. 'Theory and systems of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities'. *Soil Sci.* 126:191-199.

Bos, M.G. (ed.) (1989). *Discharge measurement structures. Third revised edition.* ILRI publication 20, Wageningen.

Bouten, W., G. Van Eijsden, A.C. Imeson, F.J.P.M. Kwaad, H.J. Mücher & A. Tiktak (1985), 'Ontstaan en erosie van de lössleemgronden in Zuid-Limburg'. *KNAG Geografisch Tijdschrift,* Vol.19, No.3, 192-208.

Bryan, R.B., G. Govers & J. Poesen (1989), 'The concept of soil erodibility and some problems of assessment and application'. *Catena* 16 (393-412).

Buishand, T.A. & C.A. Velds (1980), *Neerslag en verdamping. Klimaat van Nederland 1*. Nederlands Meteorologisch Instituut.

Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1988), *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 572.

Coote et al., 1988. 'Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils. Can'. *J. Soil Sci.*, 68 (405-416).

Cremers, N.H.D.T., A.P.J. de Roo & M. Van Der Zijp (in prep.), *Validating a splash detachment equation with field measurements.*

Cruse, R.M. & W.E. Larson, 1977. 'Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact'. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31 (777-781).

Dabney, S.M., McGregor,K.C., Meyer, L.D., Grissinger, E.H. & G.R. Foster (1993), *Vegetative barriers for runoff and sediment control.* Submitted for symposium 'Integrated resources management and landscape modification for environmental protection', 13-14 December 1993, Chicago, IL, American Society of Agricultural Engineers.

Davis, L.A. and S.P. Neuman, 1983. *Documentation and user's guide: UNSAT2 Variable saturated flow model, final rep.* Colorado (U.S.A.), WWL/TM-1791-1, Water, Waste & Land, Inc., Ft. Collins.

De Roo, A.P.J., L. Hazelhoff & P.A. Burrough (1989), Soil erosion modelling using 'ANSWERS' and Geographical Information Systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.14, 517-532. John Wiley & Sons, Ltd.

De Roo, A.P.J (1991), 'The use of ^{137}Cs as a tracer in an erosion study in South-Limburg (The Netherlands) and the influence of Chernobyl fallout'. *Hydrological Processes Vol.5*, 215-227.

De Roo, A.P.J. & H.Th Riezebos (1992), 'Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion'. *CATENA,* Vol.19., 221-239.

De Roo, A.P.J. (1993), 'Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems ; validity and applicability of the 'ANSWERS' model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands) and one in Devon (UK)'. *Netherlands Geographical Studies*, Vol.157, 295 p.

Dickey, E.C.,& D.H. Vanderholm (1981), 'Vegetative filter treatment of livestock feedlot runoff', *J. Environmental Qual.*, Vol.10(3), 279-284.

Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mostaghimi, S., Shanholtz, V.O. & W.L. Magette (1987), *Evaluating nutrient and sediment losses from agricultural lands: vegetative filter strips*. United States Environmental Protection Agency.

Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mostaghimi, S. & D. Lee (1989), *Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control.* Transactions of the ASAE. Vol. 32(2), 1989, 513-519.

Edwards, W.M., Owens, L.B. & R.K. White (1983), 'Managing runoff from a small, paved beef feedlot'. *J. Environ. Qual.* 12: 281-286.

Feddes, R.A., P.J. Kowalik en H. Zaradny (1978), *Simulation of field water use and crop yield.* PUDOC Wageningen. Simulation Monographs.

Gayle, G.A. & R.W. Skaggs, 1978. *Surface storage on bedded cultivated lands.* Transactions of the ASAE (101-104).

Govers, G. (1990), 'Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow'. *IAHS Publ.*189, 45-63.

Halbertsma & Veerman, submitted for publication. *A new calculation procedure and simple set-up for the evaporation method to determine soil hydraulic functions.*

Heidemij (1998), *Regenduurlijnen. Voor het ontwerp en beheer van waterbeheersings- en rioleringsprojecten.* Heidemij Adviesbureau.

Hirschi, M.C. & B.J. Barfield, 1988. *KYERMO - A Physically Based Research Erosion Model. Part I - Model Development.* Transactions of the ASAE 31(3) (804-813).

Hirschi, M.C. & B.J. Barfield, 1988. *KYERMO - A Physically Based Research Erosion Model. Part II - Model Sensitivity Analysis and Testing.* Transactions of the ASAE 31(3) (814-820).

Jackson, C.R. (1992), 'Hillslope infiltration and lateral downslope unsaturated flow'. *Water Resour. Res.* 28: 2533-2539.

Kemper, D., Dabney, S., Kramer, L., Dominick, D., & T. Keep (1992), 'Hedging against erosion'. *Journal of Soil & Water Conservation*, 47(4): 284-288.

Klute, A. (ed). 1986. *Methods of soil analysis. Part 1: physical and mineralogical methods, 2nd ed.* Agronomy 9 (2). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A.

Kwaad, F.J.P.M. (1991), *Summer and winter regimes of runoff generation and soil erosion on cultivated loess soils (The Netherlands).* Earth Surface Processes and Landforms, Vol.16, 653-662.

Kwaad, F.J.P.M. & E.J. Van Mulligen (1991), 'Cropping system effects of maize on infiltration, runoff and erosion on loess soils in South-Limbourg (the Netherlands): A comparison of two rainfall events'. *Soil Technology*, Vol.4, 281-295.

Leenders, W.H. 1994. *De bodemgesteldheid van drie stroomgebieden voor het erosienormeringsonderzoek Zuid-Limburg. Resultaten van een bodemgeografisch onderzoek.* DLO-Staring Centrum. Rapport 270. Wageningen.

Linden, D.R. & D.M. van Doren, 1986. 'Parameters for characterizing tillage induced soil surface roughness'. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,50 (1560-1565).

Linden, D.R., D.M. Van Doren Jr. & R.R. Allmaras (1988), *A model of the effects of tillage-induced soil surface roughness on erosion.* Proceedings of the 11th International Conference of the International Soil Tillage Research Organisation, Edinburgh. Vol.1, 373-378.

Line, D.E. (1991), *Sediment trapping effectiveness of grass strips*, Proceedings of the Fifth Federal Interagency Sedimentation Conference.

Low, A.J., 1954. 'The study of soil structure in the field and the laboratory'. *Journal of Soil Science 5*
(1, 57)

Magette, W.L., Brinsfield, R.B., Palmer, R.E., Wood, J.D., Dillaha, T.A. & R.B. *Reneau (1987), Vegetated filter strips for agricultural runoff treatment.* United States Environmental Protection Agency.

McCuen, R.H. & Snyder, W.M. (1975), 'A proposed index for comparing hydrographs'. *Water Resources Research*, Vol.11, No.6, 1021-1024.

McGregor, K.C. & S.M. Dabney (1993), *Grass hedges reduce soil loss on no-till and conventional-till cotton plots.* Proceedings of the 1993 southern conservation tillage conference for sustainable agriculture, Monroe, Louisiana, June 15-17.

Merriam, R.A. (1960), 'A note on the interception loss equation'. *Journal of Geophysical Research, Vol.65*, 3850-3851.

Mohamoud, Y.M. (1992), 'Evaluating Manning's roughness coefficients for tilled soils'. *J. of Hydrology,* 135(192), 143-156.

Moore, I.D. & C.L. Larson (1979), *Estimating micro-relief surface storage from point data.* Transactions of the ASAE, Vol.20, No.5, 1073-1077.

Moore, I.D. & G.R. Foster (1990), *Hydraulics and overland flow. In: Anderson, M.G. & T.P. Burt (eds.)*, Process studies in hillslope hydrology. John Wiley & Sons, 215-254.

Morgan, R.P.C., J.N. Quinton & R.J. Rickson (1992), *EUROSEM Documentation manual. Version 1: June 1992.* Silsoe College, Silsoe.

Morris, E.M. & D.A. Woolhiser (1980), 'Unsteady onedimensional flow over a plane: Partial equilibrium and recession hydrographs'. *Water resources research* 16(2): 355-360

Mualem, Y. (1976), 'A new model for predicting the hydrologic conductivity of unsaturated porous media'. *Water Resources Research, Vol. 12*, 513-522.

Neibling, W.H. & E.E. Alberts (1979), *Composition and yield of soil particles transported through sod strips*. ASAE Paper No. 79-2065. ASAE, St. Joseph, MI.

Nieswand, G.H., Hordon, R.M., Shelton, T.B., Chavooshian, B.B. and S. Blarr (1990), 'Bufferstrips to protect water supply reservoirs: a model and recommendations. Water Resources Bulletin. *American Water Resources Association*. Vol. 26, no.6, 959-966.

Onstad, C.A., 1984. *Depressional Storage on tilled surfaces*. Transactions of the ASAE, (729-732).

Proefboerderij Wijnandsrade (1992, 1993) *Van onderzoek naar voorlichting, Onderzoeksresultaten van de Proefboerderij Wijnandsrade*, Jaarverslagen.

Quine, T.A. & D.E. Walling (1991), 'Rates of soil erosion on arable fields in Britain: quantitative data from caesium-137 measurements'. *Soil use and management, Vol.7*, No.4, 169-176.

Rauws, G. & G. Govers, 1988. 'Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils'. *J. of Soil Sci.*, 39 (111-124).

Remson, I., G.M. Hornberger & F.J. Molz (1971), *Numerical methods in subsurface hydrology*. Wiley, 389 p.

Römkens, M.J.M. & C.J. Wang, 1986. *Effect of tillage on surface roughness*. Transactions of the ASAE 29(2) (429-433).

Schouten, C.J., M.C. Rang & P.M.J. Huigen (1985), 'Erosie en wateroverlast in Zuid-Limburg'. *Landschap*, Vol.2, 118-132.

Šimùnek J., T. Vogel and M.Th. Van Genuchten, 1992. *The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, version 1.1*. Riverside (California, U.S.A.), U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agricultural Research Service, Riverside, California, Research Report No. 126, 169 p..

Stolte, J. and J.H.M. Wösten. 1991. *Soil physical schematisation of the catchment area of the river Vecht*. DLO-Staring Centrum. Report 45. Wageningen.

Stolte, J., G.J. Veerman and M.C.S. Wopereis. 1992. *Manual soil physical measurements, version 2.0*. DLO-Staring Centrum. Technical Document 2. Wageningen

Stolte, J., C.J. Ritsema, G.J. Veerman en W. Hamminga. 1994. *Bodemfysische schematisatie van drie stroomgebieden in Zuid-Limburg op basis van een erosiegevoeligheidsanalyse.* DLO-Staring Centrum. Rapport 343. Wageningen.

Thomas, D.B. (1988), *Conservation of cropland on steep slopes in eastern Africa. In: Moldenhauer*, W.C. & N.W. Hudson (eds), Conservation farming on steep lands, Soil and Water Conservation Soc., Ankeny, IA, pp. 140-149.

Van den Elsen, H.G.M. and J.W. Bakker. 1992. 'A universal device to measure the pressure head for laboratory use or long-term stand-alone field use'. *Soil Sci. 54* 6:458-464

Van der Zijp, M., 1993. *Onderzoek naar erosie-bestrijdende teeltsystemen voor maïs en suikerbieten 1992-1993.* Amsterdam, vakgroep fysische geografie en bodemkunde, Universiteit van Amsterdam & Stichting proefboerderij Wijnandsrade.

Van Deursen, W.P.A. & Kwadijk, J. (1990), *Using the WATERSHED tools for modelling the Rhine catchment.* In: Harts, J.J., Ottens, H.F.L. & Scholten, H.J. (eds.), Proceedings of EGIS '90: First European Conference on Geographical Information Systems, Amsterdam, 254-262.

Van Deursen W.P.A. & Wesseling, C.G. (1992), *PC-RASTER handleiding*, Vakgroep Fysische Geografie, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht.

Van Eijsden, G.G. & A.C. Imeson (1985), 'De relatie tussen erosie en enkele landbouwgewassen in het Ransdalerveld, Zuid-Limburg'. *Landschap*, Vol.2, 133-142.

Van Genuchten, M.Th., 1980. 'A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils'. *Soil Sci. Soc. Am.* J. 44:892-898.

Van Genuchten M.Th., F.J. Leij and S.R. Yates, 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.* Riverside (California, U.S.A.), U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agricultural Research Service.

Von Hoyningen-Huene, J. (1981), *Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen.* Arbeitsbericht Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK, Braunschweig, p.63

Vleeshouwer, J.J. en J.H. Damoiseaux. 1990. *Bodemkaart van Nederland 1:50 000: Toelichting bij kaartblad 61-62 west en oost Maastricht - Heerlen.* DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Vuurmans, K.J.& A.J. Gelok (1993), 'Weerstandscoëfficiënten en maximaal toelaatbare stroomsnelheden. In grasbanen voor waterafvoer in hellende gebieden'. *Landinrichting* 33(6): 11-17.

Wagner, L.E.,1992. *Profile meter program. documentation.* United States Department of Agriculture, 27p.

Walkley, A.,1947. 'A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils - effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents'. *Soil Science 63* (251-264).

Wilson, L.G. (1967), 'Sediment removal from flood water by grass filtration', *Transactions of the ASAE, Vol.* 10(1), 35-37.

Wind, G.P. 1968. *Capillary conductivity data estimated by a simple method.* In: Rijtema. P.E. and H. Wassink (eds.). *Water in the unsaturated zone, Proceeding of the Wageningen symposium, june 1966.* IASH Gentbrugge/UNESCO Paris, Vol 1:181-191.

Woolhiser, D.A. & J.A. Ligett (1967), 'Unsteady, onedimensional flow over a plane / the rising hydrograph'. *Water resources research 3*(3):753-771

Wösten J.H.M., M.H. Bannink, J.J. de Gruijter and J. Bouma, 1986. 'A procedure to indentify different groups of hydraulic-conductivity and moisture-retention curves for soil horizons'. *Journal of Hydrology,* 86 (1986) 133-145.

Young, R.A., M.J.M. Römkens & D.K. McCool, 1990. 'Temporal variations in soil erodibility'. *Catena Supplement 17* (41-53).

Aanhangsel 1 Erosiereductie winterperiode 1991/1992 en 1992/1993 (natuurlijke neerslag)

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door natuurlijke neerslag in de winter van 1991/92, zoals gemeten op proefveldjes van 33 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende de winter van 1991/92			Fractie van meetwaarde van systeem G (vaste tand cult.)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
A rogge	1.96	28.2	2500	0.44	0.34	0.76
B rogge	3.76	58.4	2520	0.84	0.70	0.76
C rogge	2.10	19.0	2563	0.47	0.23	0.78
D ploeg	2.86	79.9	3843	0.64	0.95	1.17
E rogge	1.86	34.6	2345	0.41	0.41	0.71
F stoppel	81.38	405.9	2197	18.15	4.83	0.67
G cultiva.	4.48	84.0	3295	1.00	1.00	1.00
Ha cultiva.	44.47	1127.4	-	9.92	13.42	-
Hb +wielsp.	81.18	2666.6	3254	18.11	31.75	0.99

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door natuurlijke neerslag in de winter van 1992/93, zoals gemeten op proefveldjes van 33 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende de winter van 1992/93			Fractie van meetwaarde van systeem G (vaste tand cult.)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
A rogge	1.67	37.6	1292	0.65	2.28	0.79
B rogge	1.62	25.4	1187	0.64	1.54	0.73
C rogge	1.65	26.7	1173	0.65	1.62	0.72
D ploeg	0.94	44.8	1664	0.37	2.72	1.02
E rogge	1.18	25.2	1485	0.46	1.53	0.91
F stoppel	21.55	347.8	1045	8.45	21.13	0.64
G cultiva.	2.55	16.5	1633	1.00	1.00	1.00
Ha cultiva.	8.16	308.7	-	3.20	18.75	-
Hb +wielsp.	16.67	490.0	1615	6.54	29.76	0.99

Aanhangsel 2 Erosiereductie maïsteeltsystemen in groeiseizoenen 1992 en 1993

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door natuurlijke neerslag in groeiseizoen 1992, zoals gemeten op proefveldjes van 33 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende het groeiseizoen van 1992			Fractie van meetwaarde van systeem G (praktijksysteem)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
A direct	22.25	28.7	85	1.51	0.14	0.08
B parapflug	10.72	57.5	640	0.73	0.27	0.59
C mulch	20.16	61.6	458	1.37	0.29	0.42
D d.zonder	25.84	484.8	1586	1.75	2.32	1.46
E zaaifrees	17.79	26.6	171	1.21	0.13	0.16
F stro	3.37	23.6	458	0.23	0.11	0.42
G praktijk	14.75	209.1	1087	1.00	1.00	1.00
Ha braak	41.04	1638.4	-	2.78	7.83	-
Hb +wielsp.	42.72	2815.8	1193	2.90	13.47	1.10

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door natuurlijke neerslag in groeiseizoen 1993, zoals gemeten op proefveldjes van 33 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende het groeiseizoen van 1993			Fractie van meetwaarde van systeem G (praktijksysteem)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
A direct	3.73	147.8	2381	0.82	0.82	0.91
B parapflug	2.65	292.9	3132	0.58	1.63	1.20
C mulch	4.70	127.5	2132	1.03	0.71	0.81
D d.zonder	5.29	300.7	1705	1.16	1.67	0.65
E zaaifrees	3.34	110.8	1883	0.73	0.62	0.72
F stro	1.19	20.9	1791	0.26	0.12	0.68
G praktijk	4.56	179.7	2620	1.00	1.00	1.00
Ha braak	18.16	1318.6	-	3.99	7.34	-
Hb +wielsp.	34.43	9770.3	4077	7.55	54.38	1.56

(vervolg aanhangsel 2)
Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door gesimuleerde neerslag in groeiseizoen 1992, zoals gemeten op proefveldjes van 15 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende het groeiseizoen van 1992			Fractie van meetwaarde van systeem G (praktijksysteem)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
run 1						
A direct	9.46	127.2	91	0.60	0.14	0.13
B parapflug	17.79	151.7	430	1.13	0.17	0.61
C mulch	17.37	164.6	260	1.11	0.19	0.37
D d.zonder	27.60	1131.4	341	1.76	1.28	0.48
E zaaifrees	11.46	85.1	226	0.73	0.10	0.32
F stro	6.50	33.5	304	0.41	0.04	0.43
G praktijk	15.68	886.7	708	1.00	1.00	1.00
Ha braak	26.76	2621.8	594	1.71	2.96	0.84
Hb +wielsp.	31.52	4102.1	537	2.01	4.63	0.76
run 2						
A direct	17.19	89.4	94	0.53	0.05	0.18
B parapflug	28.12	446.9	459	0.87	0.26	0.87
C mulch	22.62	236.1	210	0.70	0.14	0.40
D d.zonder	37.97	2532.7	418	1.17	1.46	0.79
E zaaifrees	19.33	53.9	318	0.60	0.03	0.60
F stro	18.02	137.4	311	0.55	0.08	0.59
G praktijk	32.49	1736.7	530	1.00	1.00	1.00
Ha braak	33.92	2741.6	713	1.04	1.58	1.35
Hb +wielsp.	41.37	3606.3	631	1.27	2.08	1.19

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door gesimuleerde neerslag in groeiseizoen 1993, zoals gemeten op proefveldjes van 15 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.1).

	Totalen gedurende het groeiseizoen van 1993			Fractie van meetwaarde van systeem G (praktijksysteem)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
run 1						
A direct	15.01	188.0	358	1.04	0.15	0.35
B parapflug	9.78	207.4	928	0.67	0.16	0.90
C mulch	17.55	462.0	566	1.21	0.36	0.55
D d.zonder	21.41	987.6	872	1.48	0.78	0.84
E zaaifrees	18.57	425.8	513	1.28	0.33	0.49
F stro	8.99	107.0	469	0.62	0.08	0.45
G praktijk	14.50	1272.4	1037	1.00	1.00	1.00
Ha braak	29.26	1042.7	1198	2.02	0.82	1.15
Hb +wielsp.	31.90	1555.4	883	2.20	1.22	0.85
run 2						
A direct	27.27	519.2	410	1.08	0.28	0.44
B parapflug	19.92	502.0	878	0.79	0.27	0.93
C mulch	22.94	674.1	606	0.91	0.36	0.64
D d.zonder	30.76	2041.4	830	1.22	1.08	0.88
E zaaifrees	25.30	750.0	484	1.00	0.40	0.51
F stro	19.26	324.5	418	0.76	0.17	0.44
G praktijk	25.21	1884.1	943	1.00	1.00	1.00
Ha braak	29.48	1027.9	1103	1.17	0.55	1.17
Hb +wielsp.	30.11	1155.8	745	1.19	0.61	0.79

Aanhangsel 3 Erosiereductie bietenteeltsystemen in groeiseizoen 1992

Waterafvoer, bodemverlies en spaterosie door gesimuleerde neerslag, zoals gemeten op proefveldjes van 15 m^2 waarop verschillende teeltmethoden zijn toegepast (zie tabel 5.2).

	Totalen gedurende het groeiseizoen van 1992			Fractie van meetwaarde van systeem G (praktijksysteem)		
systeem	afvoer (l/m2)	bodem-verlies (g/m2)	spat-erosie (g/m2)	afvoer (-)	bodem-verlies (-)	spat-erosie (-)
run 1						
A praktijk	16.6	3242.2	658	1.00	1.00	1.00
B idem,spitten	20.1	1348.5	576	1.21	0.42	0.88
C direct	12.1	59.4	241	0.73	0.02	0.37
D zaaifrees	10.6	127.5	381	0.64	0.04	0.58
E mulch	17.1	461.8	350	1.03	0.14	0.53
F diepe mulch	25.5	962.0	412	1.54	0.30	0.63
run 2						
A praktijk	25.2	2968.6	746	1.00	1.00	1.00
B idem,spitten	30.2	1164.0	697	1.20	0.39	0.93
C direct	18.1	164.6	231	0.72	0.06	0.31
D zaaifrees	20.7	375.3	351	0.82	0.13	0.47
E mulch	27.6	952.7	389	1.10	0.32	0.52
F diepe mulch	25.2	1104.4	584	1.00	0.37	0.78

Aanhangsel 4 Overzicht van de meetgegevens van het grasstrokenonderzoek.

ALGEMENE INFORMATIE						INSTROOMGEGEVENS				UITSTROOMGEGEVENS					
Proef-nr.	Breedte strook1 strook2 (m)	Hellings-hoek (graden)	Initieel vocht-gehalte (vol.%)	Eind-vocht-gehalte (vol.%)	Gras-lengte (cm)	Begin-debiet (l/s/m)	Totaal water p.strook (l)	Totaal sed. p.strook (kg)	Gem. sed. conc. (g/l)	Tijdstip begin afvoer (min.s)	Totaal water p.strook (l)	Totaal water p.strook (%)	Totaal sed. p.strook (kg)	Totaal sed. p.strook (%)	Gem. sed. conc. (g/l)
JONG GRASLAND															
4	1	5.2	10.0	38.0	27.5	0.5	472	11.32	24.0	0.25	477	101.1	6.21	54.9	13.0
	4	5.2	10.0	38.0	27.5	0.5	472	11.32	24.0	1.34	231	48.9	1.90	16.8	8.2
5	5	5.2	10.0	38.0	27.5	0.5	526	10.40	19.8	1.16	598	113.7	4.12	39.6	6.9
	10	5.2	10.0	38.0	27.5	0.5	526	10.40	19.8	3.33	219	41.6	0.81	7.8	3.7
6	1	5.2	8.6	38.0	10.0	0.5	538	10.56	19.6	0.22	534	99.3	4.88	46.2	9.1
	4	5.2	8.6	38.0	10.0	0.5	538	10.56	19.6	1.41	455	84.6	2.73	25.9	6.0
8	5	2.3	18.0	34.4	10.5	0.5	450	3.97	8.8	2.14	469	104.2	1.42	35.8	3.0
	10	2.3	18.0	34.4	10.5	0.5	450	3.97	8.8	10.45	125	27.8	0.15	3.8	1.2
9	5	2.5	17.0	40.0	17.5	0.5	488	6.96	14.3	2.29	448	91.8	1.60	23.0	3.6
	10	2.5	17.0	40.0	17.5	0.5	488	6.96	14.3	20.44	25	5.1	0.03	0.4	1.2
10*	5	2.3	37.4	38.0	17.5	0.5	535	8.96	16.7	2.08	360	67.3	1.57	17.5	4.4
	10	2.3	37.4	38.0	17.5	0.5	535	8.96	16.7	4.47	269	50.3	0.76	8.5	2.8
11*	5	2.5	24.8	37.7	17.5	0.5	476	4.33	9.1	1.24	583	122.5	2.07	47.8	3.6
	10	2.5	24.8	37.7	17.5	0.5	476	4.33	9.1	9.52	116	24.4	0.10	2.3	0.9
12**	10	4.3	24.8	42.0	18.5	0.5	983	6.69	6.8	3.45	708	72.0	1.09	16.3	1.5
OUD GRASLAND															
13	5	8.5	24.8	48.0	9.0	0.5	507	5.67	11.2	2.44	185	36.5	0.35	6.2	1.9
	10	8.5	24.8	48.0	9.0	0.5	507	5.67	11.2	14.20	52	10.3	0.04	0.7	0.8
14	1	8.5	34.4	48.0	9.0	0.5	519	10.15	19.6	0.24	479	92.3	4.23	41.7	8.8
	4	8.5	34.4	48.0	9.0	0.5	519	10.15	19.6	2.01	256	49.3	1.14	11.2	4.5
15	5	8.5	37.8	47.0	10.0	0.5	579	8.34	14.4	2.55	281	48.5	0.80	9.6	2.8
	10	8.5	37.8	47.0	10.0	0.5	579	8.34	14.4	6.10	199	34.4	0.31	3.7	1.6
16**	5	7.0	30.0	48.0	10.0	0.5	1016	9.02	8.9	1.59	825	81.2	2.48	27.5	3.0
18**	5	7.0	30.0	48.0	10.0	0.75	1229	14.40	11.7	1.34	945	76.9	3.46	24.0	3.7
17**	5	7.0	30.0	48.0	10.0	1.0	1251	12.03	9.6	1.20	969	77.5	3.06	25.4	3.2

(vervolg aanhangsel 4)

Toelichting op de gegevens die de tabel bevat:

— Algemene informatie: De langste zijde van de proefveldjes is **strookbreedte** genoemd, daar deze zijde correspondeert met de breedte van grasstroken in de praktijk.
— Instroomgegevens: hierin zijn het **ingestelde** debiet, meestal 0.5 l/s/m, en de totale hoeveelheden water en sediment opgenomen. Het debiet loopt gedurende de proef af naar circa 0.2 l/s/m. De **gemiddelde** sedimentconcentratie is opgenomen omdat de sedimentconcentratie zoals gezegd sterk varieert.
— Uitstroomgegevens: De totale hoeveelheden uitgestroomd water en sediment zijn vermeld. Ook zijn deze waarden uitgedrukt als percentage van de hoeveelheid die ingestroomd is. Deze percentages drukken het water- en sedimentopnemend vermogen uit: hoe lager het getal hoe meer door de strook is opgenomen. Tevens is de gemiddelde sedimentconcentratie vermeld.
— Jong/oud grasland maakt onderscheid tussen de twee locaties Ransdaal en Voerendaal.
— * : een sterretje achter het proefnummer geeft aan dat het hier om een herhaling gaat van een proef; uitgevoerd op een strook waar al eerder is gemeten en dus een laagje sediment aanwezig is.
— ** : twee sterretjes achter een proefnummer geven aan dat er een strook van 1 m is gebruikt in plaats van twee van 0.5 m. Dit verklaart tevens de hoge in- en uitstroomtotalen.

Aanhangsel 5 Het landgebruik per proefgebied per scenario (0, 1 en 2)

Catsop

scenario 0

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17	perm & tijd grasland	17
wintertarwe	33	wintertarwe	33
braak (stoppelveld)	50	snijmaïs	50

scenario 1

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17	perm & tijd grasland	17
wintertarwe	33	wintertarwe	33
braak (geploegd)	36	snijmaïs	50
groenbemester	14		

scenario 2A

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17	perm & tijd grasland	17
bodembedekker	1	mulchzaai	1
wintertarwe	33	wintertarwe	33
groenbemester	49	snijmaïs (praktijk)	49

scenario 2B

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17	perm & tijd grasland	17
bodembedekker	50	mulchzaai	49
wintertarwe	33	wintertarwe	33
		directzaai	1

scenario 2C

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17	perm & tijd grasland	17
wintertarwe	33	wintertarwe	33
bodembedekker	50	directzaai	50

scenario 2D

zomersituatie (%)	
perm & tijd grasland	17
wintertarwe	33
strobedekking	50

Etzenrade

scenario 0

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	1	boomgaard	1
perm & tijd grasland	16	perm & tijd grasland	16
wintertarwe	13	wintertarwe	13
braak (stoppelveld)	71	snijmaïs	71

scenario 1

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	1	boomgaard	1
perm & tijd grasland	16	perm & tijd grasland	16
wintertarwe	13	wintertarwe	13
braak (geploegd)	67	snijmaïs	70
groenbemester	3		

scenario 2A

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	1	boomgaard	1
perm & tijd grasland	16	perm & tijd grasland	16
bodembedekker	1	mulchzaai	1
wintertarwe	13	wintertarwe	13
braak (geploegd)	23	snijmaïs (praktijk)	70
groenbemester	49		

scenario 2B

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	1	boomgaard	1
perm & tijd grasland	16	perm & tijd grasland	16
bodembedekker	47	mulchzaai	46
wintertarwe	13	wintertarwe	13
groenbemester	24	snijmaïs (praktijk)	24
		directzaai	1

scenario 2C

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	1	boomgaard	1
perm & tijd grasland	16	perm & tijd grasland	16
wintertarwe	13	wintertarwe	13
bodembedekker	47	directzaai	47
groenbemester	24	snijmaïs (praktijk)	24

scenario 2D

zomersituatie (%)	
boomgaard	1
perm & tijd grasland	16
wintertarwe	13
snijmaïs (praktijk)	23
strobedekking	48

St. Gillisstraat

scenario 0

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	28	boomgaard	28
perm & tijd grasland	8	perm & tijd grasland	8
wintertarwe	<1	wintertarwe	<1
braak (stoppelveld)	64	snijmaïs	64

scenario 1

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	28	boomgaard	28
perm & tijd grasland	8	perm & tijd grasland	8
wintertarwe	<1	wintertarwe	<1
braak (geploegd)	37	snijmaïs	64
groenbemester	27		

scenario 2A

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	28	boomgaard	28
perm & tijd grasland	8	perm & tijd grasland	8
bodembedekker	39	mulchzaai	39
wintertarwe	<1	wintertarwe	<1
braak (geploegd)	3	snijmaïs (praktijk)	25
groenbemester	22		

scenario 2B

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	28	boomgaard	28
perm & tijd grasland	8	perm & tijd grasland	8
bodembedekker	61	mulchzaai	22
wintertarwe	<1	wintertarwe	<1
groenbemester	3	snijmaïs (praktijk)	3
		directzaai	39

scenario 2C

wintersituatie (%)		zomersituatie (%)	
boomgaard	28	boomgaard	28
perm & tijd grasland	8	perm & tijd grasland	8
wintertarwe	<1	wintertarwe	<1
bodembedekker	61	directzaai	61
groenbemester	3	snijmaïs (praktijk)	3

scenario 2D

zomersituatie (%)	
boomgaard	28
perm & tijd grasland	8
wintertarwe	<1
snijmaïs (praktijk)	3
strobedekking	61