

32/446 (500) 2<sup>e</sup> ex

**BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW**

**Verdroging door droge en natte rijksinfrastructuur in  
Overijssel en Gelderland**

**Een verkennende studie**

**J.W.J. van der Gaast  
P.J.T. van Bakel**

**Rapport 500**

**DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1997**



24 OKT. 1997

Lsn 942358\*

## REFERAAT

Gaast, J.W.J. van der en P.J.T. van Bakel, 1997. *Verdroging door droge en natte rijksinfrastructuur in Overijssel en Gelderland; Een verkennende studie*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 500. 50 blz.; 9 fig.; 1 tab.; 27 ref.

Om inzicht te verkrijgen in de verdroging door rijksinfrastructuur is in een GIS een methode ontwikkeld. Bij de methode is gebruik gemaakt van een aantal fasen. In de eerste fase is met gebruikmaking van de spreidingslengte het potentiële invloedsgebied van infrastructuur bepaald. Vervolgens zijn selecties gemaakt om de infrastructuur die verdroging tot gevolg heeft te selecteren. Voor de geselecteerde infrastructuur zijn de verdrogingseffecten bepaald met gebruikmaking van analytische formules. De methode is na enige aanpassing toe te passen voor geheel Nederland. Uit het onderzoek blijkt dat verdroging door infrastructuur in de provincies Gelderland en Overijssel een beperkte omvang heeft.

Trefwoorden: bufferzones, GIS, hydrologie, infrastructuur, spreidingslengte, verdroging

ISSN 0927-4499

©1997 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

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 en/of de opdrachtgever.

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.

Project 7587

(Rap500.sk/09.97)

# Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Probleem- en doelstelling	11
1.3 Methodiek	11
1.4 Leeswijzer	12
2 Literatuurstudie naar de beïnvloeding door infrastructuur op het grondwater	13
2.1 Droge infrastructuur	13
2.2 Natte infrastructuur	14
3 Potentiële verdroging door infrastructuur	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Bepaling van de drainageweerstand	17
3.3 Bepaling van de spreidingslengte	19
3.4 Bepaling van de invloedsafstand	21
3.5 Resultaten en discussie	22
4 Selectie van de verdrogende rijksinfrastructuur	25
4.1 Droge infrastructuur	25
4.2 Natte infrastructuur	28
5 Bepaling van de verdrogende effecten	29
5.1 Infrastructuur	29
5.2 Verdrogende effecten	30
6 Conclusies en aanbevelingen	35
6.1 Beperkingen onderzoeksmethode	35
6.2 Conclusies infrastructuur	36
6.3 Aanbevelingen	37
Literatuur	41

## **Woord vooraf**

In opdracht van Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland heeft DLO-Staring Centrum een verkennende studie uitgevoerd naar de verdrogingseffecten van de rijksinfrastructuur in de provincies Overijssel en Gelderland. Voor het onderzoek is een GIS-methode ontwikkeld om de mate van verdroging door infrastructuur op regionale schaal vast te kunnen stellen. De resultaten van het onderzoek en de gebruikte methode kunnen dienen als hulpmiddel, om verdroging door infrastructuur te kunnen signaleren.

Voor dit onderzoek fungeerde een begeleiderscommissie, bestaande uit:

- B. J. A. Bultink (Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland)
- K. Hin (Rijkswaterstaat Directie, Oost-Nederland)
- H. J. Reit (Provincie Gelderland)
- L. Stalpers (Provincie Overijssel)
- B. Wesseling (Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland)

De onderzoekers zijn de leden van de begeleiderscommissie en de geconsulteerde wegbeheerders zeer erkentelijk voor hun stimulerende inbreng in dit project.

## Samenvatting

In Nederland is op grote schaal verdroging opgetreden. Een van de mogelijke oorzaken van verdroging is een verandering in de infrastructuur, die voornamelijk in de periode na de oorlog in een versneld tempo heeft plaatsgevonden. Bij de aanleg van of veranderingen in de infrastructuur bestaat de kans dat tijdens de aanlegfase of permanent in de grondwatersituatie wordt ingegrepen. In opdracht van Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland heeft DLO-Staring Centrum een verkennende studie uitgevoerd naar de verdroging door rijksinfrastructuur in de provincies Gelderland en Overijssel.

Aan de hand van een literatuuronderzoek is bekeken op welke manieren verdroging door infrastructuur kan plaatsvinden. Vervolgens is door SC-DLO in een GIS een methode ontwikkeld om verdroging op regionale schaal te onderzoeken. Bij de methode wordt in eerste instantie gekeken naar het beïnvloedingsgebied van infrastructuur. Met behulp van geohydrologische gegevens en gemiddelde slootafstanden is de spreidingslengte bepaald. De spreidingslengte, die wordt berekend aan de hand van de hydraulische weerstand en het doorlaatvermogen van verschillende bodemlagen, is een maat voor de invloedsafstand van hydrologische ingrepen. Voor de te verwachten invloedsafstand van infrastructuur op de grondwaterstroming is tweemaal de spreidingslengte aangehouden. Binnen deze afstand tot de infrastructuur vindt 86% van de beïnvloeding plaats. Vervolgens is aan de hand van selecties bekeken welke delen van de infrastructuur verdroging van de door de provincies aangemerkte aandachtsgebieden voor verdroging tot gevolg hebben.

Bij de selectie is in hoofdzaak gekeken naar de drainerende werking van wegen en waterlopen. Voor de natte infrastructuur is de selectie eenvoudig te maken door te kijken naar het verschil tussen het grondwaterpeil in de omgeving en het peil in de desbetreffende waterloop. Voor de droge infrastructuur (wegen) is uitgegaan van de aanname dat wegen die op maaiveld of verhoogd aangelegd zijn een ontwatering hebben die aangesloten is op het bestaande afwateringstelsel en daardoor niet verdrogend werken. Deze aanname wordt onderschreven door wegbeheerders, die voor het onderzoek geraadpleegd zijn in de vorm van een enquête. Door deze aanname is de eventuele drainerende werking van het zandlichaam buiten beschouwing gelaten. In gebieden met een dun afdekkend pakket kan het zandlichaam deze weerstandsbiedende laag doorsnijden. In dat geval kan de drainerende werking van het zandlichaam wel tot verdroging leiden. In het onderzoeksgebied komt door het ontbreken van de deklaag deze situatie echter bijna niet voor. Door de aanname kunnen alleen de wegen in ingraving leiden tot verdroging. In gebieden met diepe grondwaterstanden ( $GT > VI$ ) is, gezien de diepe grondwaterstand, verdroging door infrastructuur niet te verwachten. In deze gebieden is de flora immers afhankelijk van hangwater. De droge infrastructuur in ingraving gelegen in een gebied met grondwatertrap VII ( $GT VII$ ) is hierom als niet verdrogend aangemerkt. Wegen in ingraving die een weerstandsbiedende leemlaag doorsnijden en hierdoor een schijngrondwaterspiegel doorsnijden worden door deze selectie buiten beschouwing

gelaten. Spoorwegen zijn, mede doordat gegevens moeilijke beschikbaar zijn, buiten beschouwing gelaten.

Voor de geselecteerde infrastructuur zijn vervolgens de verdrogende effecten bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van het peil van het desbetreffende ontwateringsmiddel en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) in de omgeving. Het peilverschil tussen de GVG en het peil van de infrastructuur is als ingreep beschouwd als gevolg van de aanleg van de infrastructuur. Nadat de ingrepen zijn bepaald is met behulp van analytische formules het verdrogende effect van de rijksinfrastructuur bepaald. De verdroging is met behulp van een GIS in de vorm van isolijnen van de verlaging inzichtelijk gemaakt.

Verdroging door de beschouwde rijksinfrastructuur blijkt op een beperkt aantal plaatsen voor te komen. Alleen een gedeelte van het Twenthekanaal en een beperkt aantal wegvakken in ingraving veroorzaken verdroging, te weten de A1 nabij Rijssen, de A32 nabij Steenwijk en de N834 nabij Hardenberg. Veel wegen in ingraving liggen in hoog gelegen gebieden met een diepe grondwaterstand of in gebieden met een dun watervoerend pakket. In beide gevallen heeft de verdroging door wegen in ingraving geen rol van betekenis.

Indien de benodigde gegevens voorhanden zijn kan de gebruikte methode snel en eenvoudig inzicht verschaffen omtrent de verdroging door infrastructuur op regionale schaal. Voor bijzondere gevallen, zoals het doorsnijden van een leemlaag met een schijngrondwaterspiegel, is onderzoek op lokale schaal noodzakelijk. Voor gedegen uitspraken omtrent de verdroging in deze bijzondere gevallen ontbreken echter de gegevens over de precieze ligging en hellingshoek van de leemlagen.

Ook veranderingen in de drainageweerstand kunnen lokaal leiden tot verdroging. Voornamelijk de drainerende werking van het zandlichaam kan hierbij van invloed zijn. Onderzoek op lokale schaal is gewenst om te bekijken in welke situaties en in welke mate de drainerende werking van het zandlichaam tot verdroging kan leiden.

De ontwikkelde analysemethode is na enige aanpassing toepasbaar op geheel Nederland voor zowel de hoofd- als de onderliggende-infrastructuur. Als belangrijkste aanpassing voor het gebruik van de methode voor geheel Nederland moet rekening gehouden worden met weerstanden die in en onder kanaalbodems voor kunnen komen. Voornamelijk voor het gebruik van de methode in het holocene deel van Nederland is deze aanpassing van belang.

De methode kan naast de bepaling van de verdroging door bestaande infrastructuur, ook gebruikt worden tijdens de beginfase van de aanleg van infrastructuur. Bij de tracé-keuze kan in een vroeg stadium inzicht verkregen worden omtrent de verdroging door de nieuw aan te leggen infrastructuur. Ook bij de aanlegfase kan de methode gebruikt worden om een indicatie te krijgen over de ruimtelijke effecten van bronbemalingen die nodig kunnen zijn tijdens de aanleg. Op grond van de verkregen gegevens kan bijvoorbeeld bepaald worden of alternatieve bouwwijzen nodig zijn om verdroging tegen te gaan.

# **1 Inleiding**

## **1.1 Aanleiding**

In Nederland is op grote schaal verdroging opgetreden. Als voornaamste oorzaken van verdroging zijn geïdentificeerd: de verbetering van de ont- en afwatering ten behoeve van de landbouw, de grondwateronttrekkingen en de verstedelijking. Echter, in de periode na de oorlog is de droge (voornamelijk wegen) en natte infrastructuur in Nederland ingrijpend gewijzigd. Daarbij bestaat de kans dat tijdens de aanlegfase of permanent in de grondwatersituatie wordt ingegrepen. De mogelijkheid dat daardoor verdroging is opgetreden is dan ook reëel. Tot nu toe is er geen landelijke studie uitgevoerd waarin de verdrogingseffecten van infrastructuur zijn geïnventariseerd. Wel is in Noord-Brabant een verkennende studie naar verdroging door de rijksinfrastructuur uitgevoerd (Marijnissen, 1994).

Door het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat is een project op landelijke schaal gestart: "Verdroging door infrastructuur". Naast een inventarisatie moet dit project ook aanwijzingen opleveren voor projectleiders over de wijze waarop ze verdroging kunnen voorkomen resp. bestrijden. Vooruitlopend op dit project heeft Rijkswaterstaat, directie Oost-Nederland, aan SC-DLO gevraagd om voor de provincies Gelderland en Overijssel een verkennende studie uit te voeren naar de verdroging door infrastructuur die bij Rijkswaterstaat in beheer is.

## **1.2 Probleem- en doelstelling**

De bijdrage van de aanleg van droge en natte rijksinfrastructuur in de provincies Overijssel en Gelderland aan de verdroging is onvoldoende bekend. Doel van het project is een verkennende studie uit te voeren naar de verdrogingseffecten van bestaande infrastructuur die bij Rijkswaterstaat in beheer is. Aangezien o.a. spoorlijnen en kleinere wateren niet in beheer zijn bij Rijkswaterstaat zijn deze buiten beschouwing gelaten. Een nevendoeel is het definiëren van herstelmaatregelen en te komen tot aanbevelingen om verdroging van nieuw aan te leggen infrastructuur te voorkomen.

## **1.3 Methodiek**

Verdroging en vernatting als gevolg van infrastructuur is afhankelijk van verschillende factoren. Door gebruik te maken van een Geografisch Informatie Systeem (GIS) kunnen de plaatsen waar infrastructuur tot verdroging kan leiden worden opgespoord. Deze potentiële verdrogingsgevoelige gebieden zijn bepaald aan de hand van de geohydrologie en gemiddelde slootafstanden van het projectgebied. Met behulp van de geohydrologische gegevens is de spreidingslengte bepaald. De spreidingslengte,

die wordt berekend aan de hand van de hydraulische weerstand en de doorlatendheid van verschillende bodemlagen, is een maat voor de invloedsafstand van hydrologische ingrepen. Voor de te verwachten invloedsafstand van infrastructuur op de grondwaterstroming is tweemaal de spreidingslengte ( $\lambda$ ) aangehouden.

Nadat de potentiële beïnvloeding door infrastructuur bepaald is, zijn selecties uitgevoerd om delen van de infrastructuur waar geen beïnvloeding van de provinciale aandachtsgebieden voor verdroging plaatsvindt te elimineren. Deze selecties zijn met behulp van gegevens omtrent de ligging van de door de provincie aangemerkte aandachtsgebieden voor verdroging, de grondwatertrappen en de ligging van bestaande infrastructuur uitgevoerd. Vervolgens is voor de overige delen van de rijksinfrastructuur de mate van beïnvloeding bepaald.

Gedurende de aanlegfase kan er sprake zijn van tijdelijke bronbemaling om werkzaamheden uit te kunnen voeren. Deze vorm van beïnvloeding zal buiten beschouwing worden gelaten in deze studie.

## **1.4 Leeswijzer**

In het navolgende wordt allereerst een overzicht gegeven van de mogelijke vormen van verdroging door infrastructuur aan de hand van literatuurgegevens. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 beschreven op welke wijze het potentiële beïnvloedingsgebied van de infrastructuur met een GIS is bepaald. In hoofdstuk 4 is een overzicht gegeven van de selectieprocedure die gebruikt is om te achterhalen welke infrastructuur verdroging tot gevolg heeft. Voor de geselecteerde infrastructuur is de bepaling van de verdroging in hoofdstuk 5 beschreven. Tenslotte is in het laatste hoofdstuk een overzicht gegeven van de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek.



## **2 Literatuurstudie naar de beïnvloeding door infrastructuur op het grondwater**

### **2.1 Droge infrastructuur**

Droge infrastructuur kan op verschillende manieren invloed hebben op de grondwaterstroming en de daarmee samenhangende grondwaterstand. De beïnvloeding kan voornamelijk plaatsvinden door de drainerende werking van de bermsloten of het zandlichaam.

De bermsloten worden aangelegd om een gewenst grondwaterpeil te handhaven en het aantal duikers onder de wegen te beperken. Indien een bermsloot het grondwaterniveau aansnijdt zal directe beïnvloeding van de grondwaterstroming plaatsvinden. Hiernaast is de invloed van een bermsloot afhankelijk van de ontwateringssituatie. In de praktijk zijn alle watervoerende bermsloten verbonden met het overige oppervlaktewater. In hoger gelegen droge gebieden fungeren de bermsloten als zaksloten. De zaksloten vangen het regenwater tijdelijk op, waarna het water via de slootbodem infiltreert. Deze zaksloten kunnen een geïsoleerde ligging hebben, waarbij ze niet zijn aangesloten op het overige oppervlaktewaterstelsel (Molenaar et al., 1993; Marijnissen, 1994).

Het zandlichaam kan de grondwaterstroming op verschillende manieren beïnvloeden. Indien aanwezig, zal bij de aanleg van het cunet de deklaag geheel of gedeeltelijk worden afgegraven. Hierdoor zal de verticale hydraulische weerstand afnemen. Bij gedeeltelijke afgraving van de deklaag zal het gewicht van het zandlichaam de doorlatendheid van het resterende deel van het afdekkende pakket weer doen afnemen (Molenaar et al., 1993). De horizontale doorlatendheid van de deklaag wordt door de aanleg van een zandlichaam sterk vergroot zodat versnelde grondwaterstroming en laterale toestroming plaats kan vinden. Indien door de aanleg van het zandlichaam, of al reeds van nature, de deklaag afwezig is kan de versnelde grondwaterstroming leiden tot een verhoging van de grondwaterdrainage. Deze verhoogde drainage als gevolg van de aanleg van een zandlichaam kan ook plaatsvinden in hoog gelegen gebieden met schijngrondwaterspiegels. Schijngrondwaterspiegels op scheefgestelde leemschubben in de Veluwe stuwwallen kunnen hierdoor gedraineerd worden, waardoor verdroging kan plaatsvinden van vennen of sprengen die afhankelijk zijn van deze schijngrondwaterspiegels (Molenaar et al., 1993).

In 1994 is door de TU-Delft een onderzoek verricht naar de verdrogende effecten van infrastructuur in de provincie Noord-Brabant (Marijnissen, 1994). Bij dit onderzoek is gekeken naar verdroging van natuurgebieden die binnen een afstand van twee kilometer van infrastructuur gelegen zijn. De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat er over het algemeen een geringe invloed is als gevolg van de infrastructuur van Rijkswaterstaat (RWS) op verdroging van natuurgebieden. Deze conclusie is ten dele toe te schrijven aan de grote afstand van natuurgebieden tot plaatsen waar de droge infrastructuur verdiept is aangelegd.

Natuurmonumenten heeft in 1993 een plan opgesteld voor de ontwikkeling van een natuurlijk bos op de plek waar het laatste oerbos van Nederland heeft gelegen. In ecologisch opzicht is dit Beekbergerwoud zeer kansrijk. Het gebied staat onder invloed van schoon middeldiep grondwater van de Oost-Veluwe. In het plan wordt ondermeer voorgesteld het gebied te vernatten en hydrologisch te isoleren. Deze vernatting mag echter niet ten koste gaan van de Rijksweg A50 die het gebied doorsnijdt. Daarom is in 1996 een hydrologisch onderzoek opgezet om inzicht te verkrijgen in het hydrologisch systeem in en rond het toekomstige Beekbergerwoud (Jorna, 1996). Uit het onderzoek komt naar voren dat de ontwatering van de A50 de grondwaterstand in het freatisch pakket verlaagd. Door deze grondwaterstandsverlaging is de kwelintensiteit in de omgeving van de rijksweg A50 wel hoger dan de kwel in de rest van het Beekbergerwoud. De diepe parrallelsloot langs de A50 trekt de kwel aan waardoor de kwel afgevangen wordt zodat deze minder ten goede komt aan een deel van het Woud.

In de jaren 1983 tot en met 1985 heeft de aanleg plaatsgevonden van het zg. Mereveldtracé van Rijksweg 27, dat onder meer door het westelijke deel van het landgoed Amelisweerd loopt. Dit tracé is grotendeels beneden het maaiveld aangelegd in een waterdichte constructie, waardoor geen bemaling van het grondwater behoeft plaats te vinden. Ter hoogte van Amelisweerd is een betonnen bakconstructie toegepast om de ingraving te beperken (Hopman, 1990). Door het Rijksinstituut voor Natuurbeheer (RIN) en adviesbureau Hopman zijn onderzoeken uitgevoerd naar de hydrologische effecten van de aanleg van de rijksweg. In beide onderzoeken is aan de hand van grondwaterstandsmetingen bekeken in hoeverre de aanleg van de rijksweg tot grondwaterstandsdingen heeft geleid. Gedurende de aanlegfase is een gemiddelde grondwaterstandsding van 0,15 m waargenomen (Beije et al., 1987). In de jaren na de aanleg hebben de grondwaterstands-karakteristieken in het gebied tussen de bakconstructie en de Kromme Rijn weer ongeveer dezelfde waarden als voor de aanleg. In beide onderzoeken komt men tot de conclusie dat de grondwaterstanden in het gebied niet merkbaar beïnvloed zijn door de wegaanleg (Beije et al., 1987; Hopman, 1990).

## **2.2 Natte infrastructuur**

De invloed van natte infrastructuur op grondwaterstanden en -stromingen vindt voornamelijk plaats in situaties waarbij het kanaalpeil verschilt van de grondwaterstand in de omgeving van een kanaal. Vooral in hellende gebieden kunnen de verschillen in kanaalpeil en grondwaterstand sterk variëren. Naast het peilverschil is de natte omtrek van een kanaal bepalend voor de mate van beïnvloeding van grondwaterstanden in de omgeving van een kanaal. Ook doorsnijding van slecht doorlatende lagen kan grote invloed hebben op de lokale hydrologie.

In het begin van de jaren tachtig is de invloed van de voorgenomen verbetering van de Zuid-Willemsvaart op de landbouw onderzocht (Wit et al., 1985). De voorgenomen verbetering van de Zuid-Willemsvaart hield onder andere verbreding van het kanaalprofiel, en het verkleinen van het aantal kanaalpannen in. De grondwaterstandsveranderingen tengevolge van de uit te voeren kanaalverbeteringen zijn berekend met het grondwatermodel GELGAM (Royen, 1983, 1984). Voor het

vaststellen van de invloed van deze grondwaterstandsveranderingen op de actuele verdamping is het grondwatermodel SWATRE gebruikt. Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat de beoogde verbeteringen aan de Zuid-Willemsvaart veel effect hebben op de landbouw. De te verwachten schade bestaat voornamelijk uit vochttekorten voor de landbouw.

Voor een gedeelte van het Twenthekanaal zijn berekeningen gedaan aan de wegzijging uit het hoofdkanaal en de verhoging van de grondwaterstanden (Wit et al., 1988). Afhankelijk van het verschil in stijghoogte tussen het kanaal en de grondwaterstand, is een wegzijging vanuit het kanaal berekend van 40 tot 100 mm/d. De berekeningen zijn gedaan met het stationaire grondwaterstromingsmodel FEMSAT. De kwel veroorzaakt op een afstand van 500 m vanaf het kanaal een stijging van de grondwaterstand van 10 tot 30 cm. De voorgenomen verbreding van het kanaal van 50 naar 60 m resulteert, onder gelijkblijvende omstandigheden, in betrekkelijk weinig effect. Hierbij wordt aangenomen dat het effect van de verbreding van het kanaal van tijdelijke aard is. Met behulp van GELGAM-berekeningen is voor de voorgenomen verbreding van het kanaal een verhoging van het wegzijgingsdebiet direct na de uitvoering van de werkzaamheden van circa 60% bepaald (Wesseling, 1988a). De hiermee gepaard gaande stijging van de grondwaterstand bedraagt over het algemeen meer dan 20 cm binnen een strook van 200 m vanaf het kanaal. Na heraanslibbing van de kanaalbodem resteert een blijvende toename van het wegzijgingsdebiet van circa 7% gepaard gaande met een verhoging van de grondwaterstand in de orde van 5 cm op een afstand van 200 m ter weerszijde van het kanaal. Aan de hand van metingen na baggerwerkzaamheden nabij Eefde, is vastgesteld dat 3 weken na beëindiging van de baggerwerkzaamheden een sliblaag is gevormd met een weerstandswaarde die vergelijkbaar is met die van de oorspronkelijke kanaalbodem (Wesseling, 1988b).

## **3 Potentiële verdroging door infrastructuur**

### **3.1 Inleiding**

Om de invloed van infrastructuur op de regionale grondwaterstroming te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van een geografisch informatie systeem (GIS). Met gebruikmaking van het GIS is in eerste instantie gekeken naar de potentiële hydrologische beïnvloeding door infrastructuur. Hierbij is gebruik gemaakt van digitale bestanden van de geohydrologie, de waterlopen, de rijksinfrastructuur en de digitale bodemkaart van Nederland. Voor de bepaling van de potentiële invloed van infrastructuur is uitgegaan van een buffer rondom de rijksinfrastructuur, waarbinnen beïnvloeding plaats zou kunnen vinden. Voor het potentiële beïnvloedingsgebied (de bufferafstand) is de spreidingslengte ( $\lambda$ ) gebruikt.

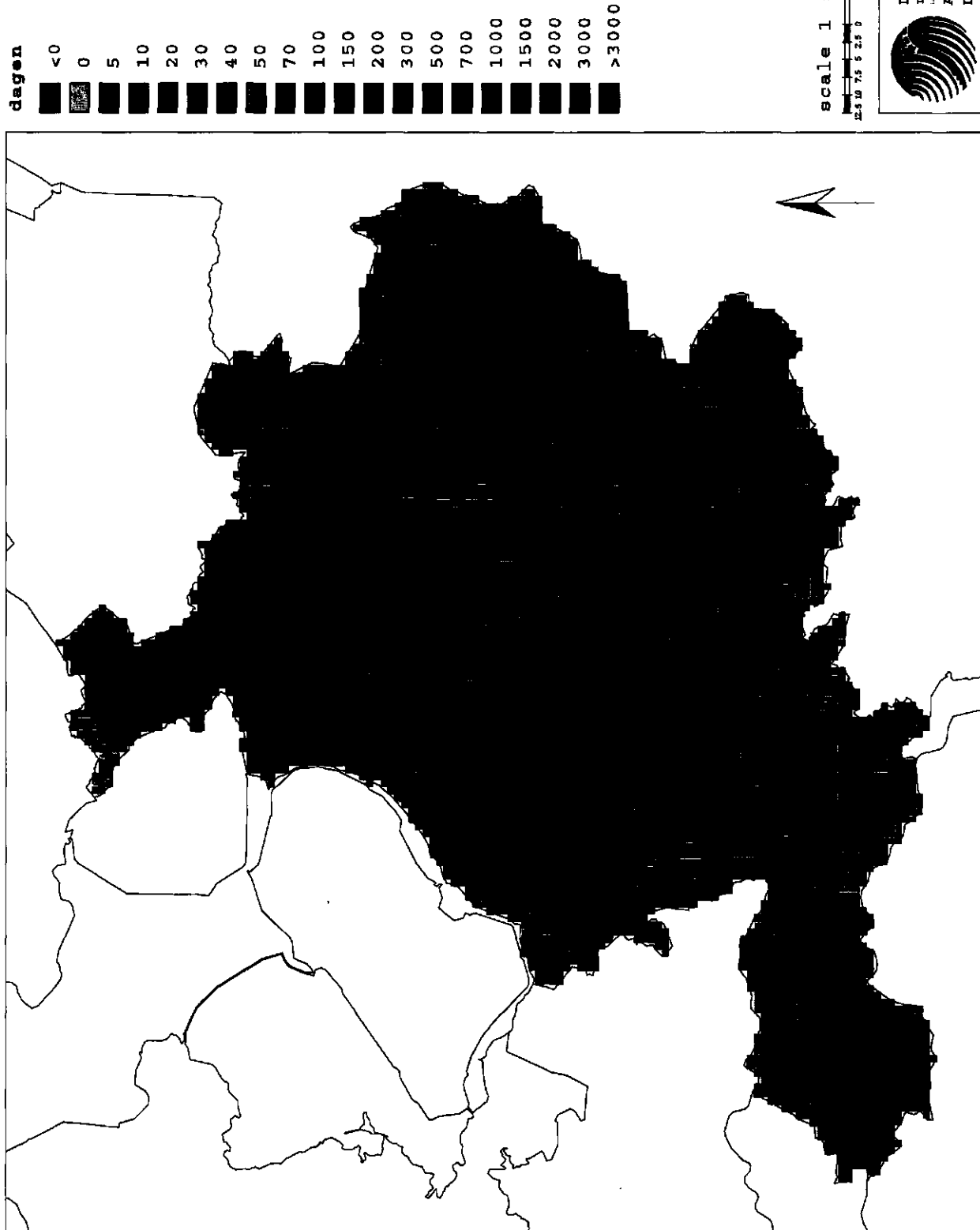
Voor de bepaling van de drainageweerstand en de spreidingslengte is gebruik gemaakt van gegevens van de geohydrologische opbouw van de provincies Gelderland en Overijssel. De gegevens zijn afkomstig van het LGM-bestand (Pastoors, 1992) en de studie kwetsbaarheid (Van Duijvenbouden en Breeuwsma, 1987). In het kader van het project relatie grondwater-oppervlaktewater dat momenteel door SC-DLO uitgevoerd wordt, zijn de gegevens van het landelijk grondwatermodel (LGM) en de studie kwetsbaarheid samengevoegd. Bij het samenvoegen van de gegevens zijn de gegevens van de studie kwetsbaarheid gebruikt om de ondiepe hydrologische pakketten nader onder te verdelen. Deze gegevens zijn gebruikt om de spreidingslengte te bepalen.

### **3.2 Bepaling van de drainageweerstand**

Voor de berekeningen van de drainageweerstand (aanhangel 1) is uitgegaan van een ontwateringsbasis van 1,2 m - mv. De slootafstanden zijn afkomstig van de landschapsecologische kartering Nederland (LKN) (Bolsius et al., 1994). In de LKN-bestanden is de totale lengte aan waterlopen per kilometerhok opgenomen. Deze lengte is omgerekend naar een gemiddelde slootafstand per vierkante kilometer.

De radiale doorlatendheid is afhankelijk van de verhouding tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid. Aangezien geen informatie omtrent de anisotropie onbekend is, is de verticale en de horizontale doorlatendheid in eerste instantie gelijk verondersteld. Deze veronderstelling heeft tot gevolg dat de radiale component van de drainageweerstand in gebieden met een afdekkend pakket dat dikker is dan de drainagebasis, zeer hoog is. Hierdoor was de berekende drainageweerstand in het rivierengebied irreëel. Gezien de irreële waarde van de drainageweerstand in het rivierengebied is voor dit gebied gerekend met een minimale horizontale doorlatendheid van 0,5 m/d. De radiale component van de drainageweerstand is hierdoor verlaagd, zodat de berekende drainageweerstand van het rivierengebied reëler is (fig. 1).

**Fig. 1 Drainageweerstand**



scale 1 : 850000



DLO - Staring Centrum, Wageningen  
Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied  
Afdeling Landbouwkundige Wetenschappen, Wageningen  
Author: J.W.J. van der Gaast  
Date: 05 Sep 97

### 3.3 Bepaling van de spreidingslengte

Voor de bepaling van de invloed van infrastructuur op het grondwater is uitgegaan van lijnvormige elementen waarlangs verlaging van de grondwaterstand is opgetreden. Om deze invloed te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van de spreidingslengte als maat voor de herkomst van onttrokken water (Mazure, 1936; Kruseman en De Ridder, 1970; TNO, 1964). Voor dit uitgangspunt is het niet voldoende om alleen gebruik te maken van de drainage-/voedingsweerstand. De drainageweerstand is een maat voor de relatie tussen neerslag en de hoeveelheid water die uit een gebied wordt afgevoerd. Veranderingen in het drainagestelsel zullen de drainageweerstand, en daarmee de hoeveelheid afvoer, beïnvloeden. De herkomst van het drainagewater is echter alleen te bepalen met behulp van de spreidingslengte. De spreidingslengte houdt naast de drainageweerstand ook rekening met het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket en de weerstand van het afdekkende pakket (fig. 2; formule 1). Bij lage weerstanden en een gering doorlaatvermogen van het watervoerend pakket is de spreidingslengte gering. De herkomst van drainagewater naar een drainerende waterloop zal door de lage weerstand die het water ondervindt afkomstig zijn van een geringe afstand van de waterloop.

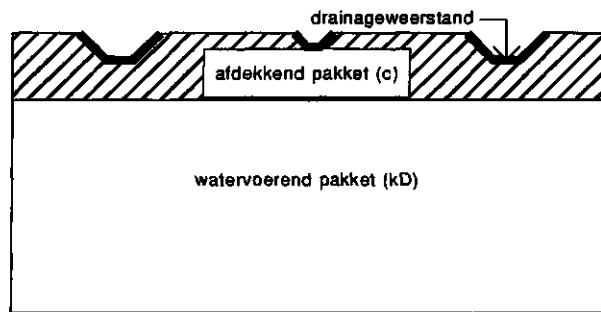


Fig. 2 Bepalende variabelen voor de spreidingslengte

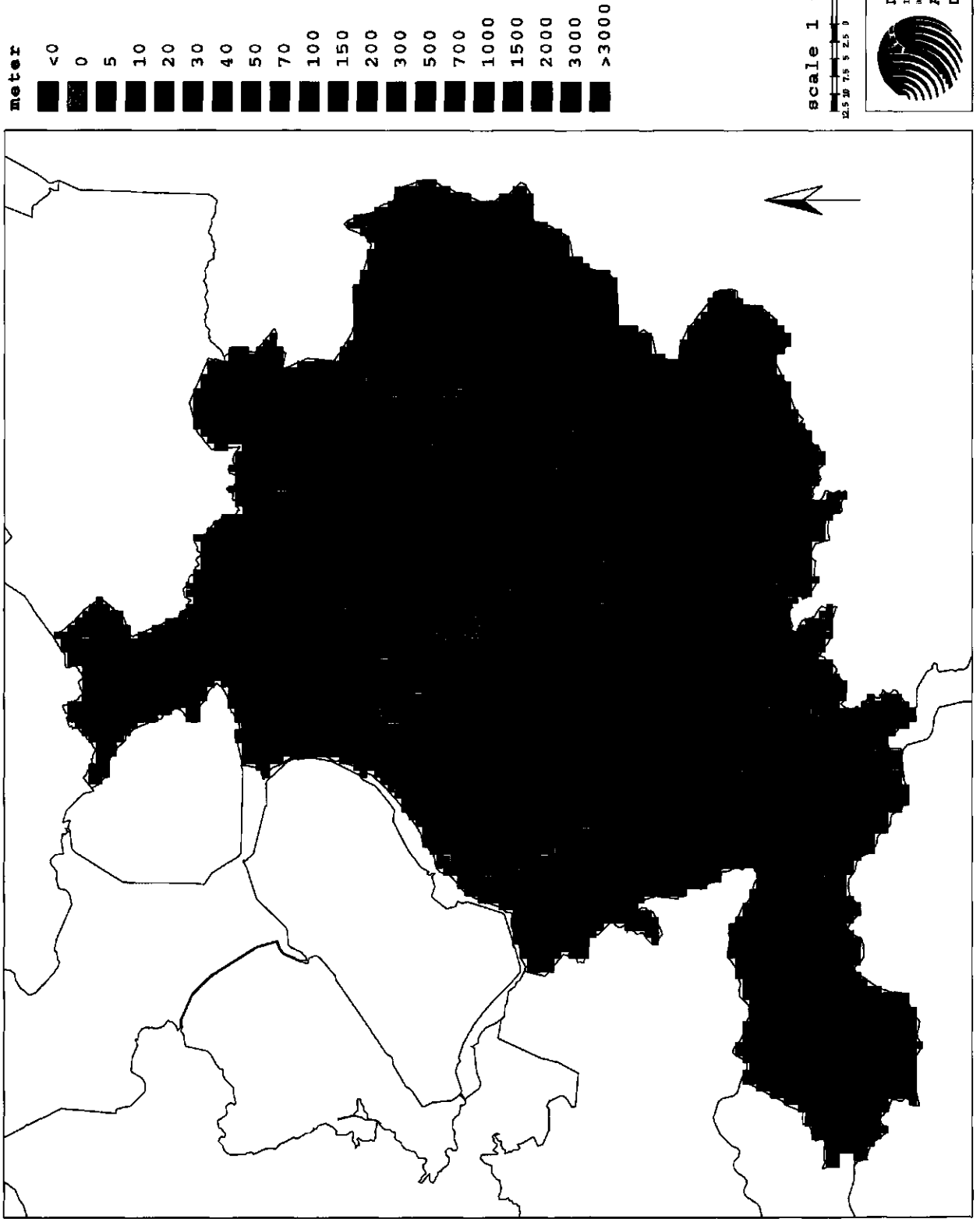
De bepaling van de spreidingslengte heeft eveneens in een GIS plaatsgevonden (fig. 3). Voor de berekening van de spreidingslengte is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$\lambda = \sqrt{kD(c+\gamma)} \quad (1)$$

waarin:

- $\lambda$  = spreidingslengte (m)
- $k$  = doorlatendheid (m/dag)
- $D$  = laagdikte (m)
- $c$  = weerstand van het afdekkende pakket (dagen)
- $\gamma$  = drainageweerstand (dagen)

**Fig. 3 Spreidingslengte**



### 3.4 Bepaling van de invloedsafstand

Voor de invloedsafstand van infrastructuur is uitgegaan van een maximale afstand van tweemaal de spreidingslengte ( $2\lambda$ ). Aan de hand van de verhouding tussen enerzijds de hoeveelheid water die is geïnfiltreerd over een afstand  $x$  tot een lijnvormig element (bermsloot/kanaal) en anderzijds de totale hoeveelheid water die naar een lijnvormig element stroomt, kan het beïnvloedingspercentage berekend worden. Voor de bepaling van de beïnvloeding geldt de volgende formule (naar Mazure, 1936; Edelman, 1972; Verruijt, 1974) (fig. 4):

$$\frac{q_x}{q_0} = e^{-x/\lambda} \quad (2)$$

waarin:

$q_x$  = hoeveelheid geïnfiltreerd/opgeweld water over een afstand  $x$  tot een lijnvormig element (mm/d)

$q_0$  = hoeveelheid water dat naar of uit een lijnvormig element stroomt (mm/d)

$x$  = afstand (m)

$\lambda$  = spreidingslengte (m)

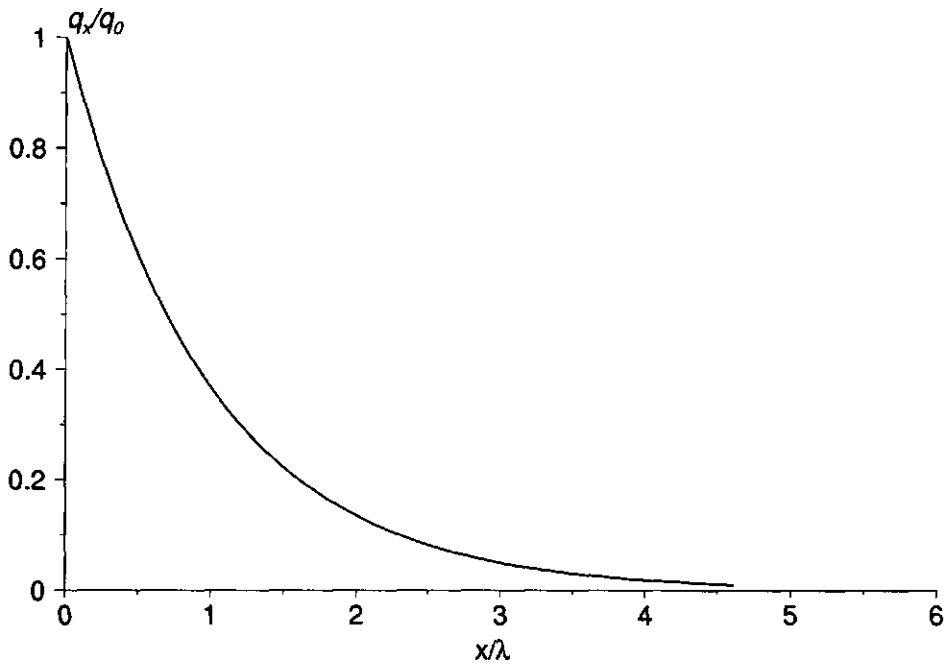


Fig. 4 Grafische weergave van formule 2

Aan de hand van formule (2) en de spreidingslengtekaart (fig. 3) kan de herkomst van onttrokken water bepaald worden. Indien uitgegaan wordt van een maximale beïnvloedingsafstand van  $2\lambda$  vindt voor lijnvormige elementen 86% van de beïnvloeding binnen deze afstand plaats. De overige 14% beïnvloeding vindt buiten deze afstand plaats.



Voor de bepaling van de invloedsafstand is de kaart met rijksinfrastructuur over de kaart met spreidingslengte gelegd. Hierna is om de rijksinfrastructuur een bufferzone gelegd met een afstand van  $2\lambda$ . Naast deze invloedszone zijn de provinciale aandachtsgebieden voor verdroging in figuur 5 weergegeven.

### 3.5 Resultaten en discussie

De spreidingslengte in het projectgebied varieert van enkele tientallen meters tot 2,5 km. In het oostelijk deel van Gelderland en Overijssel is de spreidingslengte over het algemeen gering door de geringe dikte van het watervoerend pakket. Op de Veluwe komt daarentegen een zeer grote spreidingslengte voor door het grote doorlaatvermogen van het eerste watervoerend pakket en de hoge drainageweerstand, welke op zijn beurt veroorzaakt wordt door de grote slootafstanden op de Veluwe.

In het tussenliggende gebied, het oostelijke gedeelte van de Achterhoek en Salland, komt over het algemeen een spreidingslengte van 500 tot 1500 meter voor. De maximale invloedsafstand komt hiermee op 1000 tot 3000 m. In een onderzoek naar de wegzijging van het Twenthekanaal in het traject Eefde - Lochem reikt de invloed van het kanaal op sommige plaatsen tot meer dan 2000 m (Wit et al., 1988). Wesseling (1988a) hanteert een maximale invloedsafstand van 1000 m. Voor de berekening van de spreidingslengte is echter geen drainageweerstand meegerekend, wat de spreidingslengte doet verhogen.

De invloedsafstand van het Twenthekanaal blijkt echter sterk afhankelijk van de situatie rondom het kanaal. Door de ligging van relatief diep insnijdende beken in de lengterichting van een kanaal kan de invloedsafstand van het kanaal sterk verkort worden. De beken kunnen een sterke drainerende werking hebben waardoor infiltrerend water vanuit een kanaal wordt afgevangen door beken. Hierdoor kan de berekende invloedsafstand plaatselijk sterk overschat zijn omdat bij de bepaling van de invloedsafstand alleen rekening is gehouden met de geohydrologie en de gemiddelde drainagesituatie, en geen rekening is gehouden met de lokale situatie.

In de kaart (fig. 5) is te zien dat de natuurgebieden waar beïnvloeding kan plaatsvinden voornamelijk gelegen zijn langs de Overijsselse Vecht en enkele gebieden nabij de IJssel. De natuurgebieden binnen de bufferzones zijn over het algemeen verdrogingsgevoelig. Op enkele plaatsen komen echter ook natuurgebieden binnen de bufferzone voor die verdrogingsongevoelig zijn door een diepe grondwaterstand (GT VII). Het betreft hier de nabij de rivieren gelegen duinvaaggronden.

Voor het bepalen van de invloedsafstand is gebruik gemaakt van de spreidingslengte. Als gevolg van de gebruikte procedure is bij de buffering de spreidingslengte gebruikt ter plaatse van de waterloop. Gezien de resolutie van spreidingslengtekaart ( $\text{km}^2$ ) zal de bufferafstand gemiddeld genomen correct zijn. In gebieden waar de invloedsafstand groter is dan 1 km kunnen afwijkingen ontstaan. De afwijkingen zullen ontstaan indien de spreidingslengte in gebieden net naast een waterloop sterk verschillen van de spreidingslengte ter plaatse van de waterloop. Bij de analyse is

Fig. 5 POTENTIELE VERDROGGING DOOR INFRASTRUCTUUR



Schaal 1 : 750000



DLO - Staring Centrum, Wageningen  
Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied  
Afdeling Landbouw en Natuurwetenschappelijke Onderzoek en Dienstverlening  
Author: J. W. J. van der Gaast  
Date: 04-SEP-1997

de kaart met de infrastructuur over de spreidingslengte-kaart gelegd. Hierdoor wordt gebruik gemaakt van de spreidingslengte in het kilometervak waarin de infrastructuur gelegen is. Bij een grote spreidingslengte kan de invloed van de infrastructuur ook buiten de gebruikte kilometervakken plaatsvinden. De gegevens van de naastliggende kilometervakken worden bij de analyse echter niet meegenomen.

In het LKN-bestand zijn niet alle waterlopen opgenomen. Hierdoor vindt een overschatting van de drainageweerstand plaats. Het niet meenemen van de kleine waterlopen in de berekening van de drainageweerstand komt ongeveer overeen met een gemiddelde tot droge situatie. Ernst et al. (1970) hebben voor een gemiddelde tot droge situatie drainageweerstanden berekend van 50 tot meer dan 1000 dagen voor Oost-Gelderland. Over het algemeen is de door Ernst et al. (1970) berekende drainageweerstand 100 tot 1000 dagen. Voor de natte situatie is een veel lagere drainageweerstand gevonden van over het algemeen 50 tot 300 dagen. Binnen dit onderzoek zijn voor Oost-Gelderland drainageweerstanden berekend die overwegend liggen tussen de 200 en 1000 dagen.

## 4 Selectie van de verdrogende rijksinfrastructuur

### 4.1 Droge infrastructuur

De eventuele aansnijding van het grondwatervlak door het zandlichaam of de bermsloten is bepalend voor het verdrogende effect van de droge infrastructuur. De aansnijding door bermsloten kan bepaald worden uit de hoogteligging van de weg, de ontwateringsdiepte, de maaiveldshoogte in de omgeving en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG).

Als vuistregel wordt voor wegen een noodzakelijke drooglegging van 1,2 à 1,4 m gehanteerd (fig. 6). Deze norm is opgebouwd uit een mogelijke vorstindringing van 0,7 à 0,8 m vanaf de bovenkant van de verharding en een capillaire opstijging in het ophoogzand van gemiddeld 0,5 à 0,6 m. Gezien de spreiding in capillaire stijghoogte en de variatie van de vorstindringingsdiepte over het land kan de benodigde drooglegging lokaal verschillen (Swart et al., 1994). Voor dit onderzoek is uitgegaan van een drooglegging van 1,2 m.

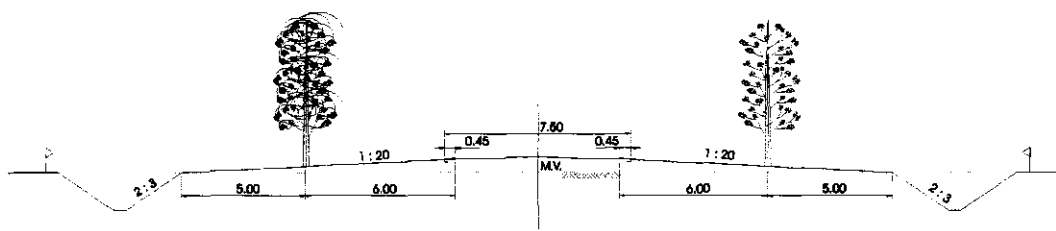


Fig. 6 Aanlegvoorschrift voor een weg op maaiveldsniveau

In laag gelegen en vlakke gebieden komen over het algemeen geen wegen in ingraving voor (pers. meded. K. Hin, 1997, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland). In deze soms natte gebieden zijn de wegen indien nodig verhoogd aangelegd om de drooglegging van 1,2 m te bewerkstelligen. Door het verhoogd aanleggen van de weg kunnen de ontwateringsmiddelen aangesloten worden op de al bestaande afwateringsstructuur. Door Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland is een onderzoek uitgevoerd naar verdroging door infrastructuur aan de hand van consultatie van mensen uit de praktijk. Ook uit dit onderzoek onder wegbeheerders blijkt dat in de praktijk de afwatering ten behoeve van wegen over het algemeen aangepast wordt aan de bestaande afwateringsstructuur. In de gebieden waar de ontwateringsmiddelen zijn aangesloten op de bestaande afwateringsstructuur, wordt de eventuele verdrogende werking van de droge infrastructuur dus niet veroorzaakt door een extra verlaging van de grondwaterstand maar eventueel door verlaging van de drainageweerstand. De ontwatering is namelijk niet dieper maar kan wel intensiever zijn. Bij brede snelwegen kan de intensiteit van het ontwateringsstelsel echter ook verkleind worden. Op de plaats van het wegprofiel waren vroeger immers waterlopen

die na de aanleg van de weg vervangen zijn door bermsloten die aansluiten op het bestaande afwateringssysteem. Afhankelijk van de dikte en de diepteligging van het zandlichaam zal deze in meer of mindere mate zorgen voor extra drainagecapaciteit. In termen van verdroging is de wegverharding ook van belang. De verdamping van water van een verhard oppervlak is immers veel geringer dan de verdamping van bodem met begroeiing.

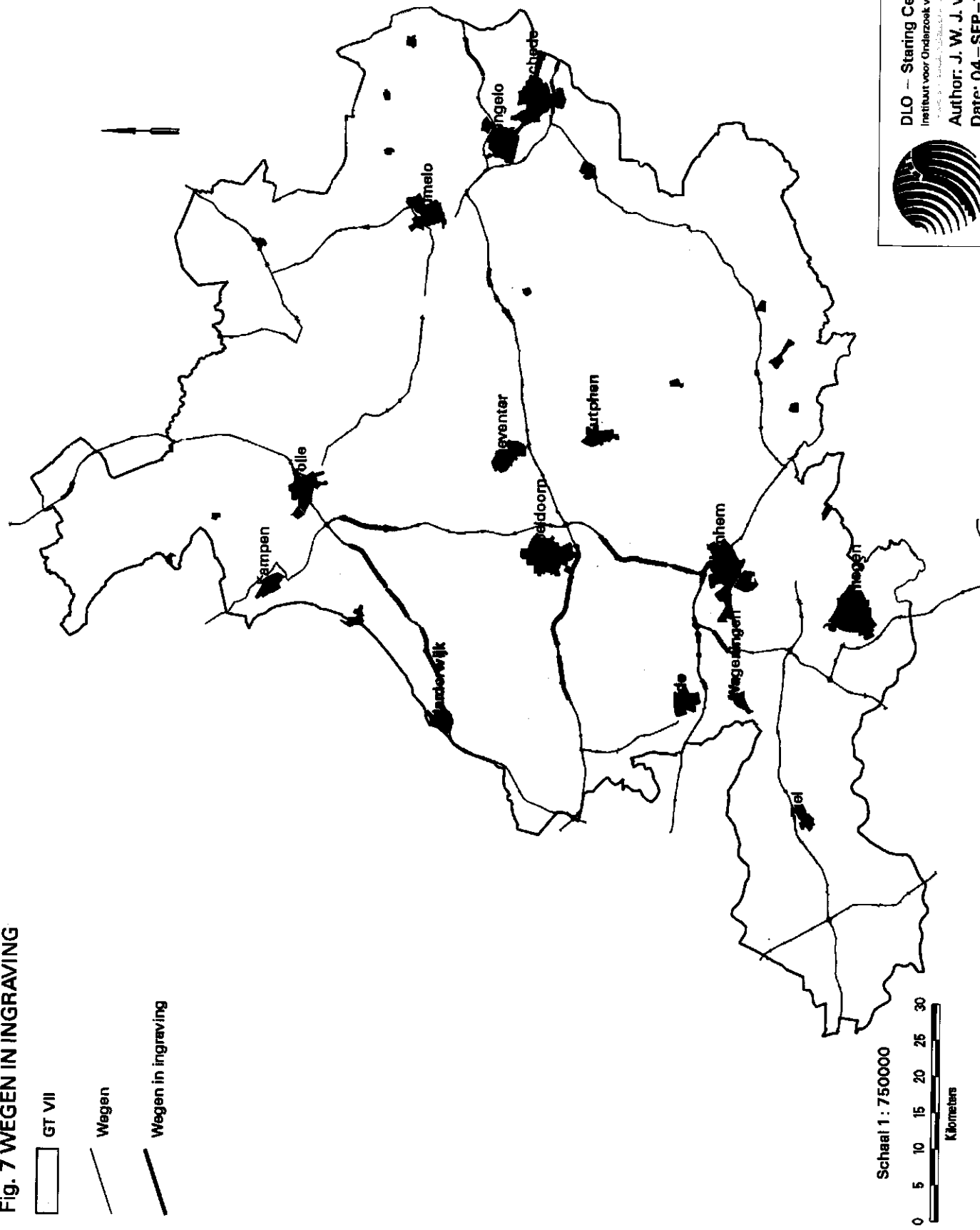
Op plaatsen waar de ontwateringsmiddelen niet aangesloten kunnen worden op de al bestaande afwateringsstructuur is een gemaal of bemaling nodig om het water af te kunnen voeren. Situaties waarbij een gemaal nodig is komen echter maar zelden voor. In de provincie Gelderland zijn enkel permanente onttrekkingen t.b.v. infrastructuur aanwezig. De totale onttrokken hoeveelheid water bedraagt enkele honderden m<sup>3</sup>/jaar (pers. meded. H.J. Reit, 1997, Provincie Gelderland).

In de hoog gelegen gebieden ligt een rijksweg vaak in ingraving. Het betreft hier bijvoorbeeld de Veluwe die hoog gelegen is en diepe grondwaterstanden kent (fig. 7). De verdrogende werking van deze ingesneden weg zal gezien de diepe grondwaterstanden waarschijnlijk zeer gering zijn. Verdroging kan in deze hoog gelegen gebieden wel plaatsvinden wanneer leem of andere ondoordringbare lagen doorsneden zijn als gevolg van de aanleg van infrastructuur.

Voor de bepaling van het verdrogende effect als gevolg van veranderingen in het drainagestelsel en de drainageweerstand blijken veel aspecten van belang te zijn. Bovendien kunnen de veranderingen elkaar tegenwerken en opheffen. Gezien de complexiteit en de te verwachten marginale bijdrage aan de verdroging zijn veranderingen in de drainageweerstand binnen dit project buiten beschouwing gelaten. Alleen rijkswegen in ingraving die een verlaging van de drainagebasis tot gevolg kunnen hebben zijn voor de bepaling van de verdroging in dit onderzoek meegenomen. Deze verdrogende werking kan alleen plaatsvinden in gebieden waar de grondwaterstanden hoog zijn ( $GT < VII$ ). Een deel van de wegen in ingraving ligt zoals te verwachten is in een gebied met  $GT VII$  (fig. 7). Het betreft hier bijvoorbeeld de Veluwe en dekzandruggen die doorsneden zijn door een weg.

Verdroging als gevolg van infrastructuur is in deze gevallen niet te verwachten door de diepe ligging van het grondwatervlak. Hierdoor zullen de bermsloten het grondwatervlak niet aansnijden en fungeren de bermsloten als zaksloten. De zaksloten vangen tijdelijk het regenwater op dat vervolgens wegzakt in de bodem. De flora is in een gebied met  $GT VII$  afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid hangwater. Verdroging door wegen in insnijding in een gebieden met  $GT VII$  kan alleen plaatsvinden door het doorsnijden van leemlagen. Voor de bepaling van de verdroging als gevolg van het doorsnijden van leemlagen zijn nauwkeurige gegevens omtrent de ligging van de leemlagen noodzakelijk. Aangezien deze gegevens niet beschikbaar zijn is deze vorm van verdroging buiten beschouwing gelaten.

Fig. 7 WEGEN IN INGRAVING



DLO – Staring Centrum, Wageningen  
Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied

Author: J. W. J. van der Gaast

Date: 04 – SEP – 1997

## 4.2 Natte infrastructuur

Voor de bepaling van de effecten van de natte rijksinfrastructuur zijn de grote rivieren buiten beschouwing gelaten. De grote rivieren zijn van oudsher aanwezig en het is moeilijk om ingrepen zoals verdieping te kwantificeren. De sterk gekanaliseerde Overijsselse Vecht heeft enerzijds een verdrogende werking door versnelling van de afvoeren en anderzijds een vernattend effect in droge perioden doordat het water vastgehouden wordt. Omdat de eventuele verdrogende effecten door de Overijsselse Vecht moeilijk te bepalen zijn is deze voor de bepaling van de verdroging buiten beschouwing gelaten. Om grondwaterstandseffecten te bepalen is het noodzakelijk uit te gaan van een duidelijke referentie situatie. Voor de Overijsselse Vecht is dit lastig te bepalen omdat de stuwen in de loop van deze eeuw geplaatst zijn. Dat in dit onderzoek de Overijsselse Vecht niet wordt meegenomen betekent overigens niet dat er geen verdroging plaatsvindt als gevolg van de kanalisatie. Verdroging in het dal van de Overijsselse Vecht kan bijvoorbeeld plaatsvinden door peilveranderingen. De peilveranderingen kunnen op hun beurt plaatselijk de kwelsituatie wijzigen en tot verdroging leiden. Opvallend is dat juist in het dal van de Overijsselse Vecht veel gebieden zijn aangemerkt met (hoge) prioriteit t.a.v. aanpak van de verdroging.

Het Twenthekanaal is opgedeeld in een aantal kanaalpanden met verschillende peilen. Aan de hand van het kanaalpeil, de maaiveldshoogten en de GVG is bekeken in welke kanaaltrajecten het kanaal drainerend werkt. Over het algemeen is er een openvolging te zien van een drainerend traject gevolgd door een infiltrerend kanaaltraject, gezien vanuit het oosten. Deze afwisseling is het gevolg van stuwen die de peilen in de kanaalpanden handhaven. Benedenstrooms van een stuw ligt het kanaal vaak in ingraving. In stroomafwaartse richting gaat de ingraving geleidelijk over in een verhoogde ligging van het kanaal tot aan de volgende stuw. Gezien de infiltrerende werking van een verhoogd kanaaltraject zijn deze voor de verdroging buiten beschouwing gelaten. Bepaling van de effecten kan in de overige gebieden, waar het kanaal in een ingraving ligt, plaatsvinden aan de hand van de maaiveldshoogte, de GVG, en het kanaalpeil.

## 5 Bepaling van de verdrogende effecten

### 5.1 Infrastructuur

De ingreep als gevolg van de aanleg van infrastructuur kan gedefinieerd worden als een verschil in drukhoogte tussen de infrastructuur en de grondwaterstand in de omgeving. Deze ingrepen zijn voor de wegen in ingraving met GT < VII bepaald uit de maaiveldshoogte, de GVG, de wegligging en de drooglegging. De GVG is ontleent aan de GT aan de hand van een vertaaltabel (tabel 1).

*Tabel 1 Vertaaltabel om per grondwatertrap (GT) de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) af te leiden (Bron: Van der Sluijs, 1990)*

GT	GVG (cm)
I	15
II	25
II*	45
III	40
III*	50
IV	70
V	55
V*	65
VI	90
VII	>125
VII*	>200

De maaiveldshoogte in de omgeving van de verdrogende infrastructuur is bepaald aan de hand van de topografische kaart 1:25 000. Voor de verdrogende infrastructuur is de gemiddelde maaiveldshoogte bepaald voor iedere vierkante kilometer waarin de infrastructuur gelegen is. De hoogte van de wegen is bepaald uit een driedimensionaal model van de wegen dat van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat afkomstig is. Voor het Twenthekanaal is per kanaalpand het stuwpeil gebruikt om de ingreep als gevolg van de aanleg van het kanaal te kunnen bepalen.

Met behulp van de GVG en de maaiveldshoogte is het grondwatervlak ten opzichte van NAP berekend. Aan de hand van de wegligging ten opzichte van NAP uit het driedimensionale model en de benodigde ontwatering van 1,2 m, is de ontwateringsbasis ten opzichte van NAP bepaald. Vervolgens is de ingreep berekend aan de hand van het verschil tussen de wegligging en het grondwatervlak. In enkele gevallen bleek het grondwatervlak onder het niveau van de weg uit te komen. Gezien het gegeven dat de geselecteerde wegvakken in ingraving liggen in een gebied met GT < VII, is een situatie waarbij het grondwatervlak onder het wegniveau uitkomt niet mogelijk. Daarom is voor deze gevallen het maaiveldsniveau bijgesteld. De gemiddelde maaiveldshoogte per vierkante kilometer hoeft immers niet representatief te zijn voor het desbetreffende weggedeelte. Dit geeft eveneens aan dat de uitkomsten niet exact zijn maar indicatief.



Voor het Twenthekanaal is eveneens het grondwatervlak aan de hand van de GVG en de maaiveldshoogte bepaald. Samen met het kanaalpeil voor de verschillende kanaalpannen is de ingreep berekend.

## 5.2 Verdrogende effecten

Nadat de ingrepen bepaald zijn, zijn met behulp van analytische formules de verdrogende effecten bepaald voor de rijksinfrastructuur met een ontwaterende werking (aanhangel 2). De berekeningsmethode is voor de droge en de natte infrastructuur identiek. Aan de hand van de volgende formule is de afstand tot de infrastructuur berekend voor verschillende verlagingsintervallen (naar Mazure, 1936; Edelman, 1972; Verruijt, 1974):

$$x = -\ln\left(\frac{(\varphi_p - \varphi_x)}{(\varphi_p - \varphi_k)}\right)\lambda \quad (3)$$

Waarin:

- $x$  = afstand tot een ontwateringsmiddel (m)
- $\varphi_x$  = stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (m)
- $\varphi_p$  = polderpeil (m)
- $\varphi_k$  = kanaalpeil (m)
- $\lambda$  = spreidingslengte ( $\sqrt{kD(c+\gamma)}$ ) (m)

Met gebruikmaking van deze formule kan de afstand tot een waterloop bepaald worden waarvoor een vaste verlaging in het eerste watervoerend pakket geldt (fig. 8).

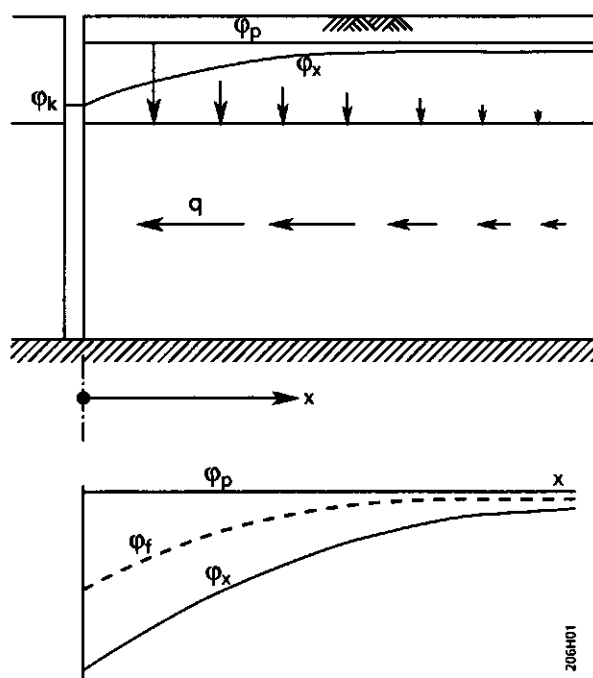


Fig. 8 Grafische weergave van de berekeningsmethode ter bepaling van de verdroging

Voor de bepaling van de verdroging in natuurgebieden is de grondwaterstands­daling in het freatische pakket echter van belang. Tussen het eerste watervoerende pakket en het freatische pakket zit nog een weerstand die bestaat uit de weerstand van het afdekkende pakket en de drainageweerstand. Afhankelijk van de verhouding van de twee weerstanden zal de grondwaterstand in het freatische pakket meer of minder uitzakken. Voor de berekening van de verlaging in het freatische pakket is dus naast formule 3 de verhouding tussen de twee weerstanden van belang. De bepaling van de afstand tot een bepaalde verlaging in het freatische pakket kan met behulp van de volgende formule berekend worden:

$$x = -\ln\left(\frac{(\varphi_p - \varphi_r) (c + \gamma)}{(\varphi_p - \varphi_i) \gamma}\right) \lambda \quad (4)$$

waarin:

$c$  = weerstand van het afdekkende pakket (dagen)

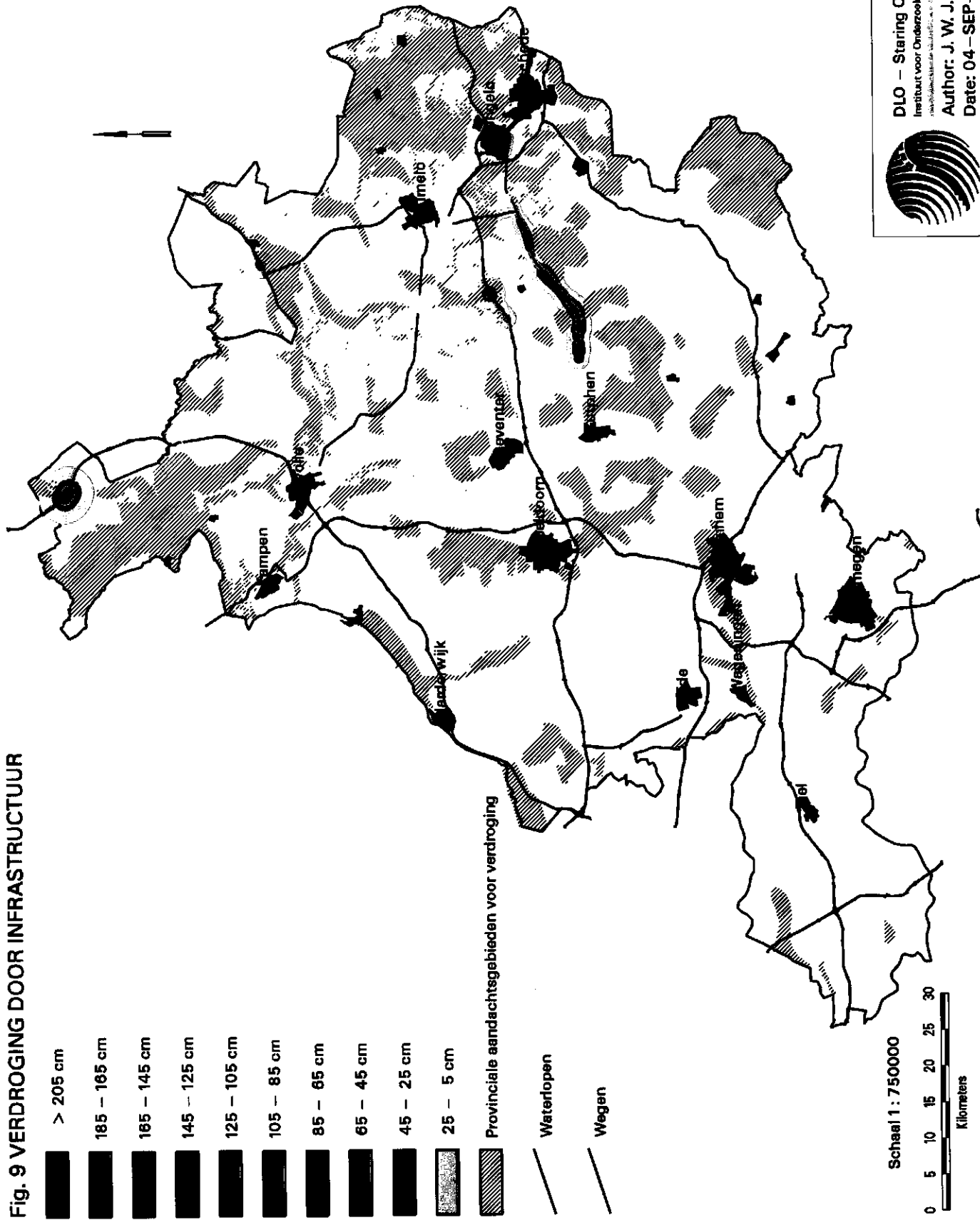
$\gamma$  = drainageweerstand (dagen)

In het onderzoeksgebied ontbreekt echter het afdekkende pakket, waardoor de berekende stijghoogte in het eerste watervoerende pakket gelijk is aan de stijghoogte in het freatische pakket. Indien het afdekkende pakket ontbreekt kan dus volstaan worden met formule (3).

Voor verschillende verlagingintervallen is de afstand tot de verdrogende infrastructuur berekend waardoor het mogelijk is om in een GIS de verlagingisohypsen te bepalen (fig. 9). De toename van het beïnvloede gebied bij een afname van de verlaging heeft een exponentieel verloop. Dit is te verklaren uit de beïnvloedingscurve (paragraaf 3.3) die exponentieel verloopt. Door de weergave van de verdroging in combinatie met de provinciale aandachtsgebieden voor verdroging zijn de lokaties waar een conflict aanwezig is tussen de natuur en de infrastructuur in beeld gebracht. Bij de gebruikte methode is gerekend in superpositie. Lokaal kan er een verschil zijn tussen de berekende verdroging en de werkelijke verdroging. De invloedsafstand van de infrastructuur in ingraving kan geringer zijn als gevolg van bijvoorbeeld een nabijgelegen beek. In dergelijke situaties kan de verdroging eventueel met een twee- of driedimensionaal grondwaterstromingsmodel uitgerekend worden, mits er genoeg gegevens voorhanden zijn.

Op de kaart (fig. 9) is te zien dat het Twenthekanaal voornamelijk in het traject tussen Lochem en Delden grondwaterstandsverlaging veroorzaakt. Als gevolg daarvan vindt in enkele natuurgebieden in dit traject verdroging plaats. De verdroging door het Twenthekanaal kan echter overschat zijn. Bij de analyse is immers geen rekening gehouden met de eventuele vernatting door het kanaal. Nabij een stuw of sluis in het kanaal vindt er een overgang plaats van een infiltratie situatie bovenstrooms, naar een drainerende situatie benedenstrooms van de sluis. Bij de analyse is er van uitgegaan dat de kanaalbodem is dichtgeslibd. Hierdoor is een weerstands­biedende laag ontstaan waardoor er weinig wegzijging zal plaatsvinden. Daarom is de wegzijging buiten beschouwing gelaten. Door de wegzijging buiten beschouwing te laten is het mogelijk dat de invloed van de afzonderlijke drainerende kanaalgedeelten in elkaar over gaan. In werkelijkheid zit er tussen de drainerende kanaaltrajecten een

Fig. 9 VERDROGING DOOR INFRASTRUCTUUR



DLO - Staring Centrum, Wageningen  
 Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied

Author: J. W. J. van der Gaast

Date: 04-SEP-1997

gedeelte waar het kanaal kan infiltreren. Indien de weerstand van de kanaalbodem gering is zal de infiltratie een gedeelte van de verdroging opheffen. Bij de bepaling van de verdroging van de natte infrastructuur moet dus naast de verdroging ook naar vernatting gekeken worden. Indien de analyse voor beide situaties afzonderlijk uitgevoerd wordt kunnen de netto effecten van de natte infrastructuur berekend worden door beide afzonderlijke effecten van elkaar af te trekken. Voor de berekening van de infiltratie is het echter wel van belang goede informatie te hebben omtrent de kanaalbodemweerstand. Deze weerstand is bepalend voor de hoeveelheid infiltratie vanuit het kanaal.

Bij de rijksweg nabij Oldenzaal is geen verdroging waar te nemen. De rijksweg ligt echter wel in ingraving en niet in een gebied met GT VII. De weg is hier gelegen in een diepe ingraving die plaatselijk enkele meters kan bedragen. De grondwatertrap in het gebied is GT V. Deze GT wordt vaak gevonden in gebieden met een schijngrondwaterspiegel. In dit gebied wordt de GT V veroorzaakt door een ondiep liggende keileemlaag (Ebbers en Van het Loo, 1992). Het gebied in de buurt van Oldenzaal bestaat uit een stuwwal van gestuwde tertiaire klei- en leem-formaties die de hydrologische basis vormen. Ten oosten van Oldenzaal komt een dik pakket keileem dicht aan maaiveld voor (Van den Berg en Den Otter, 1993). Dit keileempakket van enkele tientallen meters fungeert evenals de gestuwde tertiaire klei als hydrologische basis. De grote fluctuaties in de grondwaterstand (GT V) worden veroorzaakt door een ondiepe gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) in een dun watervoerend pakket boven de hydrologische basis, en een lage gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) in droge perioden wanneer het watervoerende pakket droogvalt. Door de geringe dikte van het watervoerende pakket is de spreidingslengte zeer klein. In het gebied vindt wel enige verdroging plaats, maar deze verdroging is door de geringe invloedsafstand op de kaart niet waar te nemen.

Ten zuiden van Enschede komen ook enkele wegvakken voor in ingraving. Voor deze wegvakken waren geen digitale gegevens beschikbaar. Daarom zijn de wegen in ingraving ten zuiden van Enschede buiten beschouwing gelaten. Op grond van de potentiële verdroging (fig. 5) kan wel gezegd worden dat de invloedsafstand van de desbetreffende wegen in ingraving gering zal zijn.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Beperkingen onderzoeksmethode

Enkele mogelijk verdrogende effecten zijn niet eenvoudig en eenduidig te achterhalen. Voor het bepalen van de drainerende werking van het zandlichaam zijn nauwkeurige gegevens nodig omtrent de geohydrologie in de omgeving en de dikte en doorlatendheid van het zandlichaam.

- Vooral de dikte en doorlatendheid van het afdekkende pakket zijn van belang voor de mate van verdroging door het zandlichaam. Vooral in gebieden met een relatief dun afdekkend pakket kan voor de aanleg van infrastructuur het afdekkende pakket afgegraven worden. Het zandlichaam staat in dit geval direct in contact met het watervoerende pakket en kan hierdoor sterk drainerend werken. Bij dit onderzoek speelt dit aspect echter geen rol van betekenis omdat op de onderzochte plaatsen in het onderzoeksgebied geen afdekkend pakket voorkomt.
- Ook veranderingen in de drainageweerstand als gevolg van het veranderen van het oorspronkelijke afwateringspatroon zijn lokaal van aard en kunnen zowel verdrogend als vernattend werken.
- Een derde mogelijk verdrogend effect dat op lokale schaal onderzocht moet worden is het afsnijden van de oorspronkelijke afwateringsstructuur als gevolg van de aanleg van infrastructuur.
- Bij wegen in ingraving kunnen slecht doorlatende leemlagen doorsneden worden. In deze gevallen kan verdroging plaatsvinden doordat schijngrondwaterspiegels gedraineerd worden. Afhankelijk van het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket boven de leemlaag en de mate van scheefstelling van de leemlaag kan deze verdroging verstrekkende gevolgen hebben. Sprengen of vennen die afhankelijk zijn van de schijngrondwaterspiegel kunnen droogvallen.

Deze vier eventueel verdrogende effecten zijn bij dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Om deze verdrogende effecten te kunnen kwantificeren is onderzoek op lokale schaal nodig. Ook de benodigde gedetailleerde gegevens waren niet voorhanden om de genoemde aspecten van verdroging te kunnen onderzoeken.

#### ***Gebruikte methode voldoet goed***

Bepaling van het verdrogend effect van rijksinfrastructuur, dat gelegen is in ingraving, op regionale schaal is mogelijk aan de hand van analytische formules in combinatie met GIS. De nauwkeurigheid van de berekeningen is hierbij sterk afhankelijk van de resolutie en nauwkeurigheid van de benodigde gegevens. Voornamelijk voor de bepaling van de ingreep als gevolg van de aanleg van infrastructuur is de nauwkeurigheid van de gegevens van belang. Lokaal kunnen verschillen met de werkelijke verdroging voorkomen als gevolg van bijvoorbeeld beken die de invloedsafstand van infrastructuur kunnen verminderen. Hierdoor kan de verdroging lokaal overschat worden. Op regionale schaal is de gebruikte methode echter eenvoudig en snel toe te passen indien de benodigde gegevens voorhanden zijn.

### ***Gegevens moeilijk te achterhalen***

Een gedeelte van de benodigde gegevens om verdroging door infrastructuur te kunnen onderzoeken bleek moeilijk te achterhalen. Voornamelijk de benodigde gegevens om de ingrepen als gevolg van de aanleg van infrastructuur te kunnen bepalen konden in eerste instantie niet door de opdrachtgever geleverd worden. De Meetkundige Dienst te Delft bleek deze gegevens in de vorm van driedimensionale modellen in een GIS beschikbaar te hebben. Ook met deze GIS-bestanden is het niet eenvoudig de benodigde gegevens te achterhalen. Naast het driedimensionale wegenbestand bestaat er een databestand dat gekoppeld is aan een GIS met gegevens over wegen voor iedere hectometerpaal langs de rijkswegen. Wellicht kan dit databestand de bepaling van de verdroging door infrastructuur vereenvoudigen en versnellen.

## **6.2 Conclusies infrastructuur**

### ***Droge infrastructuur***

Bij wegen is de verdroging voornamelijk het gevolg van verlaging van de grondwaterstand ten behoeve van de drooglegging. Van deze grondwaterstandsverlaging is alleen sprake in die gebieden waar een weg is gelegen in ingraving. Indien een weg verhoogd of op maaiveldsniveau is aangelegd zijn de bermsloten over het algemeen aangesloten op het al bestaande afwateringssysteem. Wegen in ingraving komen vaak voor op plaatsen met diepe grondwaterstanden (GT > VI). Vaak betreft het hier zandruggen die doorsneden zijn door een weg. Verdroging op deze van nature drogere zandruggen is hierdoor niet te verwachten. Voor de bepaling van de verdrogende effecten van wegen is dan ook alleen uitgegaan van wegen in ingraving in een gebied met een hogere grondwaterstand. Deze combinatie van situaties komt maar op weinig plaatsen voor. Daarnaast betreft het in de meeste gevallen korte weg-trajecten. Het betreft de A1 nabij Rijssen, de A32 nabij Steenwijk en de N834 nabij Hardenberg.

### ***Natte infrastructuur***

Voor de verdroging door natte infrastructuur zijn de grote rivieren buiten beschouwing gelaten. De grote rivieren zijn van oudsher aanwezig en het is moeilijk om ingrepen zoals verdieping te kwantificeren. Voor de Overijsselse Vecht is het moeilijk uitspraken te doen over de mate van verdroging als gevolg van tegengestelde effecten. Door de kanalisatie wordt het water tijdens natte perioden versneld afgevoerd. In droge perioden wordt het water echter langer vastgehouden door de stuwen, waardoor verdroging wordt tegengegaan. Het Twenthekanaal werkt voornamelijk in het bovenstroomse gedeelte verdrogend. Door de relatief grote terreinhelling in het oosten is het kanaal hier door middel van stuwen opgedeeld in meerdere kanaalpanen. Bovenstrooms van een stuw is het kanaal meestal verhoogd aangelegd. In deze situatie zal dan ook geen verdroging plaatsvinden. Benedenstrooms van een stuw is het kanaal echter meestal gelegen in ingraving. Hier zal wel verdroging plaatsvinden.

Verdroging door rijksinfrastructuur blijkt dus maar op een beperkt aantal plaatsen voor te komen. Alleen een gedeelte van het Twenthekanaal en een beperkt aantal wegvakken werken verdrogend. Veel wegen in ingraving blijken te liggen in gebieden

met een diepe grondwaterstand of gebieden met een dun watervoerend pakket. Dit zijn de belangrijkste redenen dat wegen in het onderzochte gebied nauwelijks verdroging veroorzaken.

### **6.3 Aanbevelingen**

#### ***Onderzoek op lokale schaal***

Om de verdroging door infrastructuur op lokale schaal te kunnen onderzoeken is aanvullend onderzoek noodzakelijk. Vooral de aspecten van verdroging die bij dit onderzoek buiten beschouwing gelaten zijn vergen nader onderzoek indien men op lokale schaal uitspraken wil kunnen doen over verdroging door infrastructuur. De drainerende werking van het zandlichaam en het doorsnijden van weerstandsbiedende lagen zijn hierbij de belangrijkste aspecten.

#### ***Onderzoek vernatting***

Voor de natte infrastructuur dient, naast de verdroging, ook naar de vernatting gekeken te worden. Verdroging en vernatting kunnen elkaar namelijk gedeeltelijk opheffen. Vooral nabij stuwen of sluizen is een abrupte overgang te vinden tussen een drainerende en een infiltrerende waterloop. Indien bij de gebruikte methode een van beide aspecten bekeken wordt zal deze bij de overgang van drainerend naar infiltrerend overschat worden. Door beide aspecten te bepalen en deze van elkaar af te trekken kan dit probleem opgelost worden.

Voor de bepaling van de vernatting is de bodemweerstand van het kanaal van groot belang. Deze weerstand is immers bepalend voor de hoeveelheid water die uit een kanaal infiltreert. Metingen aan kanaalbodemweerstand zijn noodzakelijk om de vernatting nauwkeurig vast te kunnen stellen. Ook de gebruikte methode behoeft enige aanpassing indien de kanaalbodemweerstand bij de vernattings-berekeningen wordt meegenomen. Indien de methode wordt toegepast in gebieden met een dik afdekkend pakket moet de methode eveneens aangepast worden. In deze gebieden steken de ontwateringsmiddelen niet helemaal door het afdekkende pakket heen. Het drainagewater ondervindt nog een extra weerstand door het onderste gedeelte van het afdekkende pakket dat nog aanwezig is. Met deze weerstand moet evenals bij de vernattings-berekeningen rekening gehouden worden.

#### ***Gegevensbestanden***

Voor eventuele vervolgstudies is het van belang om de benodigde gegevens beschikbaar te hebben. Ten aanzien van wegen is het wellicht mogelijk om gebruik te maken van het databestand van de Meetkundige Dienst dat gekoppeld is aan de hectometerpalen langs rijkswegen. Door van dit bestand gebruik te maken kan de bepaling van de verdroging eenvoudiger, sneller en nauwkeuriger uitgevoerd worden.

#### ***Methode geschikt voor tracé-keuze***

Indien reeds in de beginfase van de aanleg van infrastructuur (de planvorming) een analyse met betrekking tot verdroging wordt uitgevoerd kan de gebruikte methode een bijdrage leveren bij de tracé-keuze. Juist in de planfase kan zodoende rekening gehouden worden met de bescherming, ontwikkeling en eventueel herstel van

kwetsbare natte natuur. De gebruikte methode bij dit onderzoek kan zodoende naast de bepaling van de verdroging door infrastructuur gebruikt worden ter voorkoming van verdroging.

- Vooral op regionale schaal geeft de gebruikte onderzoeksmethode snel een overzicht van de potentiële verdroging.
- Voor de bepaling van het potentiële beïnvloedingsgebied kan in dit geval beter gebruik gemaakt worden van een maximale beïnvloedingsafstand van driemaal de spreidingslengte in plaats van tweemaal. Op deze manier kunnen eventuele conflictsituaties, waarbij een natuurgebied overlapt wordt door het beïnvloedingsgebied van de aan te leggen infrastructuur, opgespoord worden.
- Indien de ingreep als gevolg van de aanleg van infrastructuur bekend is kan ook de verdroging snel bepaald worden. Op grond van de uitkomsten kan een uitspraak gedaan worden omtrent de verdrogende werking van de nieuw aan te leggen infrastructuur. Deze informatie kan gebruikt worden bij de definitieve keuze van een het tracé. De verkregen informatie kan tevens gebruikt worden om te bekijken of compenserende maatregelen gewenst zijn.

### ***Verdroging tijdens aanlegfase***

De GIS-methode kan ook gebruikt worden om informatie te krijgen over de verdroging tijdens de aanlegfase. Indien nodig wordt bij de aanleg gebruik gemaakt van bronbemaling om de aanleg van infrastructuur mogelijk te maken. Door gebruik te maken van deze methode kan ter indicatie, op grond van het te handhaven peil, bepaald worden wat de invloed is van de bronbemaling. Hierdoor kan op een relatief eenvoudige manier bekeken worden of verdrogingsgevoelige natuur beïnvloed wordt door infrastructuur in de aanlegfase. Op grond van de uitkomsten kan besloten worden of er gekeken moet worden naar alternatieve bouwwijzen om de verdroging te verminderen.

### ***Maatregelen ter voorkoming van verdroging***

Als maatregelen om verdroging te compenseren kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het plaatsen van damwanden, de aanleg van parallelle waterlopen met een verhoogd peil of het tijdelijk veranderen van het droogleggings-criterium.

- Bij drainerende infrastructuur kunnen damwanden de drainage bemoeilijken. Afhankelijk van de ligging van de infrastructuur ten opzichte van de regionale stroming zal deze maatregel meer of minder effect hebben.
- De aanleg van parallelle waterlopen met een verhoogd peil langs de infrastructuur kan, afhankelijk van de geohydrologische opbouw, de verdroging in meer of mindere mate tegen gaan. Om gebruik te maken van deze methode is de mogelijkheid om water aan te voeren een vereiste. Voor de natte infrastructuur is deze methode relatief eenvoudig toe te passen door de parallelle waterlopen aan te sluiten op het bovenstroomse kanaalpand, zodat wateraanvoer altijd mogelijk is.
- Voor wegen wordt een minimale drooglegging aangehouden van 1,2 m. Deze drooglegging is berekend aan de hand van een capillaire opstijging van 0,5 à 0,6 m en een mogelijke vorstindringingsdiepte van 0,7 à 0,8 m. In de zomerperiode zou de droogleggingsnorm verlaagd kunnen worden omdat vorstindringing in deze periode niet te verwachten is. Verlaging van de droogleggingsnorm zal in deze periode de verdrogingseffecten verminderen.



***Project Ruimte voor de Rivier***

In het kader van het project Ruimte voor de Rivier, dat wordt uitgevoerd door Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland, zullen maatregelen ter vergroting van de afvoercapaciteit van de grote rivieren worden ontwikkeld. Voor die gevallen waarin de oplossing bijvoorbeeld wordt gezocht in het verdiepen van het winterbed, verdient het aanbeveling om het eventuele verdrogende effect hiervan te onderzoeken. De in het voorliggende rapport beschreven methode is hiervoor geschikt.

## Literatuur

Berg, M.W. van der en C. den Otter, 1993. *Geologische kaart van Nederland 1: 50.000, Blad Almelo-Oost/Denekamp (280/29)*. Haarlem, Rijks Geologische Dienst.

Bolsius E.C.A., J.H.M. Eulderik, C.L.G. Groen, W.B. Harms, M.G.A.M. van der Linden, B.J. Looise, G.J. Maas, E.P. Querner, W.L.M. Tamis, R.W. de Waal, H.P. Wolfert en M. van 't Zelfde, 1994. *Een digitaal bestand voor de landschapsecologie van Nederland; Eindrapport van het LKN-project*. Den Haag, Rijksplanologische Dienst/CML/SC-DLO, LKN-rapport nr 4.

Duijvenbooden, W. van en A. Breeuwsma, 1987. *Kwetsbaarheid van het grondwater, kartering van kenmerken van de Nederlandse bodem in relatie tot de kwetsbaarheid van het grondwater voor verontreiniging*. 's-Gravenhage, RIVM, rapport 65.

Ebbers, G. en H. van het Loo, 1992. *Bodemkaart van Nederland, Toelichting bij kaartblad 28 Oost - 29 Almelo - Denekamp*. Wageningen, DLO Staring Centrum.

Edelman, H.J., 1972. *Groundwater hydraulics of extensive aquifers*. Wageningen, International institute for land reclamation and improvement, ILRI, bulletin 13.

Ernst, L.F., 1983. *Wegzijing en kwel; de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden*. Wageningen, ICW, rapport 7.

Ernst L.F., N.A. de Ridder and J.J. de Vries, 1970. A geohydrologic study of East Gelderland. *Geologie en Mijnbouw*. Volume 49 (6), p. 457-488.

Grontmij, 1995. *Provincie Overijssel plan van aanpak verdroging*. Zwolle/Zeist, Grontmij.

Hopman, technisch installatie- en adviesbureau, 1990. *Hydrologisch onderzoek "Amelisweerd"; hydrologisch onderzoek naar de gevolgen van de aaleg en de aanwezigheid van RW-27-Mereveldtracé op Amelisweerd*. Zeist, Technisch installatie- en adviesbureau Hopman.

Jorna, F.J., 1996. *(Eco)hydrologisch onderzoek Beekbergerwoud*. 's-Graveland, Natuurmonumenten. ✶

Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder, 1970. *Analysis and evaluation of pumping test data*. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Marijnissen, M., 1994. *Een andere kijk op wegen en kanalen, Een verkennend onderzoek naar verdroging door rijksinfrastructuur in beheer bij Rijkswaterstaat directie Noord-Brabant*. TU-Delft.

Mazure, J.P., 1936. *Geohydrologische gesteldheid van de Wieringermeer*. 's-Gravenhage, Algemene landsdrukkerij, pp 67-131.

Molenaar, A., A. van Leerdam en T. Garritsen, 1993. *Ecohydrologische Systeemanalyse, Corridor Utrecht - Arnhem*. Utrecht, Vakgroep Milieukunde Universiteit Utrecht.

Pastoor, M.J.H., 1992. *Landelijk grondwatermodel; conceptuele modelbeschrijving*. RIVM, RIVM-rapport nr. 714305004.

Ritzema, H.P., 1994. *Drainage principles and applications*. Wageningen, The Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Royen, E.M.E., 1983 *Berekening verandering grondwaterstanden ten gevolge van de verbetering van de Zuid-Willemsvaart in het traject Den Dungen-Erp*. Rijkswaterstaat, Nota 84.7.

Royen, E.M.E., 1984. *Berekening verandering grondwaterstanden ten gevolge van de verbetering van de Zuid-Willemsvaart op het traject Helmond -Nederweert en bij de omleiding Den Bosch*. Rijkswaterstaat, Nota 84.13.

Sluijs, P. van der, 1990. Vochtlevering van de grond. In: *W.P. Locher en H. de Bakker. Bodemkunde van Nederland. Deel 1. Algemene bodemkunde*. Den Bosch, Malmberg. pp. 167-180.

Swart, J.H., D.J. Verburg en E. Vos, 1994. *Handleiding wegenbouw, Ontwerp verhardingen*. Delft, Rijkswaterstaat, Dienst weg- en waterbouwkunde.

TNO, 1964. *Steady flow of ground water towards wells*. The Hague, TNO.

Verruijt, A., *Theory of groundwater flow*. London, Macmillan and Co LTD.

Wesseling, B., 1988a. *Kwelonderzoek Twenthekanalen GELGAM-berekeningen hoofdkanaal*. Arnhem, Rijkswaterstaat, D.W.B./RIZA Nota 88.027.

Wesseling, B., 1988b. *Kwelonderzoek Twenthekanalen Gevolgen baggerwerk meergelegenheid Eefde*. Arnhem, Rijkswaterstaat, D.W.B./RIZA Nota 88.010.

#### ***Niet-gepubliceerde bronnen***

Beije, H.M., G.M. Dirkse en T.Reijnders, 1987. *Hydrologische en vegetatiekundige effecten van de aanleg van rijksweg A27 door Amelisweerd*. Leersum, Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Intern rapport 87/33.

Wit, K.E., E. Van Rees Vellinga en J.G. te Beest, 1985. *De mogelijke invloed voor de landbouw van de voorgenomen verbeteringen van de Zuid-Willemsvaart*. Wageningen, ICW nota 1607.

Wit, K.E., J.G. te Beest en H.Th.L. Massop, 1988. *Berekening van de wegzijging uit het hoofdkanaal van de Twenthekanalen*. Wageningen, ICW, nota 1884.

## Aanhangsel 1 Berekening van de drainageweerstand

Bij de berekening van de drainageweerstand is uitgegaan van de volgende formules (Ernst, 1983):

$$\gamma_h = \frac{L^2}{8 \Sigma k D} \quad (1)$$

$$\gamma_r = L \Omega = L \left( \frac{1}{\pi k_r} \ln \frac{a D_r}{u} \right) \quad (2)$$

$$\gamma_i = L \frac{c_{bs}}{u} \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha (\gamma_h + \gamma_r + \gamma_i) \quad (4)$$

waarin:

- $\gamma$  = drainageweerstand (dagen)
- $L$  = slootafstand (m)
- $k$  = doorlatendheid (m/dag)
- $D$  = laagdikte (m)
- $\Omega$  = radiale weerstand (m)
- $k_r$  = radiale doorlatendheid (m/dag)
- $a$  = geometriefactor (-)
- $\alpha$  = vormfactor (-)
- $D_r$  = laagdikte (m)
- $u$  = natte omtrek (m)
- $c_{bs}$  = intreeweerstand (dagen)

De geometriefactor ( $a$ ) is bepaald aan de hand van een aantal voorwaarden (Ritzema, 1994). Indien de drainagebasis onder het afdekkend pakket is gelegen ( $d1 \leq 1,2$ ) wordt een geometriefactor van 1 gehanteerd. Bij een verhouding van de doorlatendheid, waarbij  $k2/k1 \geq 50$  is de geometriefactor 4. In alle andere gevallen ligt de geometriefactor tussen de 1 en de 4. Hiervoor is een gemiddelde van 2 aangehouden. Voor de vormfactor ( $\alpha$ ) is 0,82 aangehouden (Ernst, 1983).

Voor de berekening van de radiale weerstand is een vervangende doorlatendheid ( $k_r$ ) en een vervangende laagdikte ( $D_r$ ) bepaald. Voor de vervangende laagdikte is de diepte van de drainagebasis van de laagdikte afgetrokken.

## Aanhangsel 2 Hydrologische effectbepaling

Indien een peilverandering in een kanaal of grotere waterloop bekend is kan de verandering in de grondwaterstroming bepaald worden aan de hand van analytische formules. Met behulp van de analytische formules kunnen stijghoogteveranderingen en veranderingen in de kwel/wegzijging berekend worden. Uit het drukverschil ( $dh$ ) kan het debiet ( $q_0$ ) naar de waterloop berekend worden uit de volgende formule:

$$q_0 = \beta(\varphi_p - \varphi_k) \quad (1)$$

met:

$$\beta = \sqrt{\frac{kD}{(c+\gamma)}} \quad (2)$$

waarin:

- $q_0$  = debiet in een aquifer op de rand van een kanaal ( $m^2/dag$ )
- $\varphi_p$  = polderpeil (m)
- $\varphi_k$  = kanaalpeil (m)
- $\beta$  = hydrologische parameter (m/d)
- $kD$  = doorlaatvermogen ( $m^2/dag$ )
- $c$  = weerstand van het afdekkend pakket (dagen)
- $\gamma$  = drainageweerstand (dagen)

Nadat het debiet ( $q_0$ ) bekend is kunnen de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket en de kwel/wegzijging, voor verschillende afstanden tot de waterloop, respectievelijk berekend worden met behulp van de volgende formules (naar Mazure, 1936; Edelman, 1972) :

$$\varphi_x = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_k) e^{-x/\lambda} \quad (3)$$

$$q_x = q_0 e^{-x/\lambda} \quad (4)$$

met:

$$\lambda = \sqrt{kD(c+\gamma)} \quad (5)$$

Waarin:

- $\varphi_x$  = stijghoogte in het eerste watervoerend pakket op een afstand  $x$  tot een kanaal (m)
- $\varphi_p$  = polderpeil (m)
- $\varphi_k$  = kanaalpeil (m)
- $x$  = afstand (m)
- $\lambda$  = spreidingslengte ( $\sqrt{kD(c+\gamma)}$ ) (m)

- $q_0$  = debiet in een aquifer op de rand van een kanaal (m<sup>2</sup>/dag)  
 $q_x$  = debiet in een aquifer op een afstand x tot een kanaal (m<sup>2</sup>/dag)  
 $kD$  = doorlaatvermogen (m<sup>2</sup>/dag)  
 $c$  = weerstand van het afdekkend pakket (dagen)  
 $\gamma$  = drainageweerstand (dagen)

Voor de verandering in de stijghoogte kunnen de isohypsen van het eerste watervoerende pakket berekend worden aan de hand van formule 3 die na herschrijven luidt:

$$x = -\ln\left(\frac{(\varphi_p - \varphi_x)}{(\varphi_p - \varphi_0)}\right)\lambda \quad (6)$$

Voor de berekening van stijghoogteveranderingen in het freatische pakket moet naast formule (6) rekening gehouden worden met een weerstand die het water moet overbruggen. Deze weerstand bestaat uit de weerstand van het afdekkende pakket en de drainageweerstand. De stijghoogte in het freatische pakket kan berekend worden met behulp van de volgende weerstandsformule:

$$(\varphi_f - \varphi_x) = q_v(c + \gamma) \quad (7)$$

waarin:

$$q_v = \text{kwel/wegzijging (mm/d)}$$

In formule (7) is de  $q_v$  de kwel of wegzijging vanuit het eerste watervoerend pakket. Deze kan bepaald worden met behulp van de afgeleide van formule 2 welke als volgt luidt:

$$q_v = -q_0 \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda} \quad (8)$$

Vervolgens kan de freatische grondwaterstand berekend worden met behulp van de volgende formule:

$$\varphi_f = \varphi_x - (q_v c) \quad \text{of} \quad \varphi_f = \varphi_p + (q_v \gamma) \quad (9)$$

De freatische grondwaterstand ligt dus altijd tussen het polderpeil en de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket. Indien er geen weerstandsbiedende laag aanwezig is en de c-waarde dus 0 is, is de freatische grondwaterstand gelijk aan de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Bij een zeer lage drainageweerstand ten opzichte van de weerstand van het afdekkende pakket zal de freatische grondwaterstand het polderpeil benaderen. Uit formule 13 blijkt dat de verhouding tussen de weerstand van het afdekkende pakket en de drainageweerstand bepalend is voor de freatische grondwaterstand. Door gebruik te maken van deze verhouding kan de freatische grondwaterstand ook bepaald worden met behulp van de volgende formule:

$$\varphi_f = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_x) \frac{\gamma}{(c + \gamma)} \quad (10)$$

De freatische grondwaterstand kan ook direct berekend worden door de verhouding tussen de weerstand van het afdekkende pakket en de drainageweerstand mee te nemen in formule 1.

$$\varphi_f = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_k) e^{-x/\lambda \left(\frac{\gamma}{c+\gamma}\right)} \quad \text{of} \quad \varphi_f = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_k) e^{-x/\lambda - \ln\left(\frac{c+\gamma}{\gamma}\right)} \quad (11)$$

Om de invloed van hydrologische ingrepen op veranderingen in de stijghoogte te kunnen bepalen kan formule 15 als volgt omschreven worden:

$$x = -\ln\left(\frac{(\varphi_p - \varphi_f) (c+\gamma)}{(\varphi_p - \varphi_k) \gamma}\right) \lambda \quad (12)$$

Met behulp van formule (12) kan de afstand tot het ontwateringsmiddel met een bepaalde verlaging in het freatische pakket berekend worden. Na herhaling van de berekeningen voor verschillende verlagingen kan vervolgens met behulp van een GIS een isohypsenpatroon van de verlaging getekend worden.



## **Aanhangsel 3 Procedure voor de bepaling van verdroging door infrastructuur**

### **Benodigde gegevensbestanden:**

Grid-kaarten:	$kD$ en $c$ -waarden, laagdikte, doorlatendheden, slootafstanden
Lijn-kaarten:	Wegen, spoorwegen, waterlopen
Polygoon-kaarten:	GT, maaiveldshoogte
Databestanden:	Hectometerbestand, Kanaalpeilen

### **Fase 1:**

#### ***Bepaling van de drainageweerstand***

Indien niet aanwezig moet de drainageweerstand bepaald worden aan de hand van de kaart met slootafstanden,  $kD$  en  $c$ -waarden, laagdikte en doorlatendheden. Deze berekening kan uitgevoerd worden in een GIS. Gezien de aard van de basisbestanden is de berekening uitgevoerd in een grid met een resolutie van 1 km<sup>2</sup>.

#### ***Bepaling van de spreidingslengte***

De spreidingslengte kan bepaald worden uit het doorlaatvermogen ( $kD$ ) van het eerste watervoerend pakket, de weerstand van het afdekkende pakket ( $c$ ) en de drainageweerstand. Ook deze berekeningen zijn in een GIS uitgevoerd met rasters van 1 km bij 1 km.

#### ***Bepaling van de invloedsafstand***

Voor de bepaling van de invloedsafstand van de infrastructuur wordt de spreidingslengte als maat gebruikt. Afhankelijk van vereiste nauwkeurigheid kan een maximale invloedsafstand van twee- tot driemaal de spreidingslengte aangehouden worden. Bij tweemaal de spreidingslengte zal 86% van de beïnvloeding van de infrastructuur binnen deze zone plaatsvinden. Bij driemaal de spreidingslengte is dit percentage 95. De invloedsafstand is bepaald in een GIS aan de hand van een bufferoperatie.

#### ***Bepaling van de potentiële beïnvloeding***

Nadat de invloedsafstand bekend is kan met behulp van een GIS het potentiële beïnvloedingsgebied bepaald worden. Bij deze procedure wordt de invloedsafstand gebruikt als bufferafstand om een buffer om de infrastructuur heen te leggen. In een GIS is een kaart met de infrastructuur gelegd over de gridkaart met de invloedsafstanden. Bij deze procedure wordt de infrastructuur opgesplitst in lijnstukken. Bij iedere kruising tussen de infrastructuur en het km-grid wordt het lijnstuk van de infrastructuur opgeknipt en krijgt het lijnstuk de waarde van de desbetreffende gridcel. Deze waarde is vervolgens gebruikt voor de buffering van de infrastructuur. Het resultaat is een kaart met het gebied waar infrastructuur invloed zou kunnen hebben.

## **Fase 2: Selectie van de verdrogende infrastructuur**

### ***Droge infrastructuur***

Bij de selectie van de droge infrastructuur wordt de eventuele verdroging door veranderingen in de drainageweerstand als gevolg van de aanleg van droge infrastructuur buiten beschouwing gelaten. Bij de selectie van de droge infrastructuur wordt er verder van uitgegaan dat de ontwateringsmiddelen voor de droge infrastructuur aangesloten worden op het bestaande oppervlaktewaterstelsel. Hierdoor zal de droge infrastructuur alleen tot verdroging kunnen leiden indien deze gelegen is in ingraving. Voor de verdroging door de droge infrastructuur is het naast de ingraving ook van belang dat de ontwateringsmiddelen het grondwatervlak aansnijden. In veel gevallen komt de droge infrastructuur in ingraving voor op hoog gelegen zandruggen, waar diepe grondwaterstanden voorkomen. Verdroging is op deze plaatsen dan ook niet te verwachten. Om deze gebieden te elimineren uit de verdrogende droge infrastructuur kan een selectie gemaakt worden. Van de droge infrastructuur in ingraving kan onderscheid gemaakt worden op grond van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) welke te ontlenen is aan de grondwatertrappenkaart (GT). Bij GT VII mag verwacht worden dat de infrastructuur in ingraving gelegen is in een hoog gelegen zandafzetting. Van deze infrastructuur is verondersteld dat zij niet verdrogend werkt. Na deze selecties die uitgevoerd kunnen worden met behulp van overlay bewerkingen in een GIS, blijft een kaart over met de droge infrastructuur in ingraving met een  $GT < VII$ .

### ***Natte infrastructuur***

Voor de selectie bij de natte infrastructuur kan eveneens gebruik gemaakt worden van de GT-kaart. In de gebieden waarin een waterloop drainerend werkt zal het peil in de waterloop lager moeten zijn dan de GVG. Aan de hand van een berekening waarbij de GVG wordt afgetrokken van het peil in de waterloop ten opzichte van maaiveld, zijn de stukken waterloop die verdrogend werken eenvoudig op te sporen.

## **Fase 3: Bepaling van de verdrogende effecten van infrastructuur**

Voor de bepaling van de verdroging wordt gebruik gemaakt van een ingreep. Deze ingreep bestaat uit het drukverschil tussen de waterstand in een waterloop/bermsloot en de grondwaterstand in de omgeving. De GVG kan als maat dienen voor de grondwaterstand in de omgeving van een ontwateringsmiddel. Voor de droge infrastructuur kan het peil in de bermsloot bepaald worden aan de hand van de hoogteligging van de droge infrastructuur en de vereiste ontwateringsdiepte. Voor wegen kunnen deze gegevens waarschijnlijk ontleent worden aan een databestand dat gekoppeld is aan de hectometerpalen die langs rijkswegen aanwezig zijn. Voor waterlopen kan de ingreep bepaald worden uit het verschil tussen de GVG en het peil in de waterloop. De berekeningen zijn uitgevoerd in een GIS.

Vervolgens kan de verdroging bepaald worden met behulp van analytische formules. Hierbij is de met een GIS berekende ingreep als invoer gebruikt in een geprogrammeerd programma. In dit programma is voor verschillende verlagingen in het freatische pakket de afstand tot de infrastructuur iteratief bepaald. De berekende

afstanden zijn gebruikt om de isolijnen van de verlaging te bepalen. In een GIS zijn de isolijnen bepaald met behulp van bufferoperaties. Hierbij zijn de berekende afstand als bufferafstand gebruikt. Na deze procedure is een kaart gemaakt met daarin de grondwaterstandsverlaging in het freatische pakket als gevolg van de infrastructuur.