

32/uu6(302) 2<sup>e</sup> ex

BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW

**Methodiek locatiekeuze afval- en reststofbergingen**

**D. Boels  
M. Bonekamp  
K. Jonker**

**Rapport 302**

**DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1994**

28 JUN 1995



15n 907141 x

## REFERAAT

Boels, D., M. Bonekamp en K. Jonker, 1994. *Methodiek locatiekeuze afval- en reststofbergingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 302; 78 blz.; 9 fig.; 5 tab.; 12 aanh.

De methode voor de keuze van locaties voor afval- en reststofbergingen berust erop dat uit verschillende geschiktheidskaarten geschikte locaties worden afgeleid. Elke kaart bevat gemarkeerde gebieden die op basis van een enkelvoudig criterium geschikt zijn. De criteria zijn: afstand tussen stortzool en gemiddeld hoogste grondwaterstand meer dan 0,70 m; verspreiding van stoffen in de bodem; signalering van lekken binnen vijf jaar; zetting van de ondergrond minder dan 0,25 m; en beheersbaarheid van calamiteiten en grote lekken. Gebieden die voldoen aan alle criteria zijn het meest geschikt. De eindgeschiktheidskaart kan worden samengesteld op basis van gedigitaliseerde informatie met behulp van het ARC-INFO-pakket.

Trefwoorden: bodembescherming, geschiktheidskaart, grondwatertrap, hydrologische isolatie, signaleringstijd, zetting

ISSN 0927-4499

©1994 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO) Postbus 125, 6700 AC Wageningen.  
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

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.

## Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
2 Methodiek locatiekeuze	17
2.1 Doel locatiekeuze	17
2.2 Bodembeschermingsniveau	18
2.3 Beheersbaarheid situaties	18
2.4 Effectiviteit controlerende voorzieningen	21
2.5 Keuze criteria	22
3 Kengetallen	23
3.1 Drooglegging afval	23
3.2 Verspreiding van stoffen in de bodem	25
3.3 Signaleringstijd	28
3.4 Zetting	30
3.5 Beheersing	32
3.6 Selectiecriteria	34
4 GIS-Uitwerking	37
4.1 Basisinformatie	37
4.2 Basiskaarten	37
4.3 Criteriumkaarten.	40
4.3.1 Grondwaterstand.	40
4.3.2 Verspreiding.	41
4.3.3 Signalering.	41
4.3.4 Zetting	42
4.3.5 Beheersbaarheid	43
4.4 Eindwaarderingskaart	43
5 Conclusie en aanbevelingen	51
Literatuur	53

## Tabellen

1 Omvang bodemverontreiniging ( $\text{m}^3$ bodem per $\text{m}^2$ stortterrein) na 1000 jaar in samenhang met de kwaliteit van isolerende voorzieningen (percolaatverlies, $\text{m}\cdot\text{j}^{-1}$ ) (naar Boels et al., 1993)	19
2 Locatiekenmerken, risico's en geschiktheid (naar Boels, 1993)	21
3 Indeling grondwatertrappen	24
4 Enkele waarden voor de samendrukkingsconstanten in de formule van Koppejan	31
5 Klasse-indeling verwachte zettingen	42

### **Figuren**

1 Waarden van de verticale weerstand, $C_v$ , van de slechtdoorlatende afdekkende laag (dagen) (naar Pastoors, 1992).	26
2 Gebieden waar de infiltratie groter is dan $0,5 \text{ mm.d}^{-1}$ . (afgeleid uit Pastoors, 1992).	27
3 Zettingsgevoelige gebieden in Nederland (afgeleid uit: De Bakker en Locher, 1990)	33
4 GIS-uitwerking van het grondwaterstandscriterium	45
5 GIS-uitwerking van verspreidingscriterium	46
6 GIS-uitwerking van signaleringscriterium	47
7 GIS-uitwerking van zettingscriterium	48
8 GIS-uitwerking geschiktheid voor hydrologische isolatie ('sanering')	49
9 Eindwaarderingskaart	50

### **Aanhangsels**

1 Basiskaart met k-waarden van het eerste watervoerende pakket	55
2 Basiskaart met isohypsen van het eerste watervoerende pakket	57
3 Basiskaart met isohypsen van het tweede watervoerende pakket	59
4 Basiskaart met dikten van het eerste watervoerende pakket	61
5 Basiskaart met c-waarden van de eerste scheidende laag	63
6 Basiskaart met de van de Geologische kaart (kaartblad 51-west) afgeleide zettingenkaart	65
7 Gedigitaliseerde topologische kaart van het proefgebied	67
8 Afgeleide basiskaart met stroomsnelheden in het eerste watervoerende pakket voor het proefgebied	69
9 Afgeleide basiskaart met daarop aangegeven de verhouding tussen de stijghoogten van het eerste en tweede pakket	71
10 Grondwatertrappenkaart voor het proefgebied	73
11 Kaart met daarop aangegeven het voorkomen van kwel en infiltratiegebieden in het proefgebied	75
12 Kaart met daarop aangegeven de gebieden in het proefgebied waar kans is op een diepe grondwaterstand	77

## **Woord vooraf**

In 1993 zijn nieuwe regelgevingen van kracht geworden met betrekking tot de bescherming van de bodem rond lokale bronnen van lokale verontreiniging. Daarin zijn een aantal voorwaarden opgenomen, deels kwalitatief, deels kwantitatief van aard, waaraan locaties voor afval- en reststofbergingen vanuit het oogpunt van de bescherming van de bodem, moeten voldoen. Dit was aanleiding voor het ministerie van VROM om DLO-Staring Centrum in 1993 een studie op te dragen naar mogelijkheden voor en een aanzet tot een methode voor de keuzelocaties op basis van die bepalingen. Deze methode kan als hulpmiddel fungeren bij de ruimtelijke planvorming op regionale schaal.

Ing. P.A. Ruardi is namens dit ministerie opgetreden als onderzoekscoördinator.

De heren M. Bonekamp en K.J. Jonker hebben in het kader van hun doctoraalstudie aan de LUW, de ontwikkelde keuzemethode uitgewerkt voor GIS-toepassing.

## **Samenvatting**

### ***Achtergrond***

In Nederland wordt op het moment, exclusief de mest en baggerspecie, jaarlijks ca. 15 miljoen ton afval gestort. Geschat wordt dat bij de huidige trend naar grote regionale stortterreinen met een hoog voorzieningenniveau, gemiddeld een keer per twee jaar een nieuwe stortlocatie moet worden gevonden.

Het aanwijzen van nieuwe locaties voor stortterreinen vereist een systematische afweging van belangen en behoort tot de taak van de ruimtelijke ordening, waarvoor planvorming het belangrijkste beleidsinstrument is. Met betrekking tot potentiële locaties voor afval- en reststofbergingen zijn in de verschillende plannen (Vierde Nota Ruimtelijke Ordening, Streekplan, Bestemmingsplan en eventuele structuurplan) vrijwel geen dwingende criteria opgenomen.

### ***De opdracht***

In 1993 zijn nieuwe regelgevingen van kracht geworden met betrekking tot de bescherming van de bodem rond lokale bronnen van lokale verontreiniging. Daarin zijn een aantal voorwaarden opgenomen, deels kwalitatief, deels kwantitatief van aard, waaraan locaties van afval- en reststofbergingen vanuit het oogpunt van de bescherming van de bodem, moeten voldoen. Dit was aanleiding voor het ministerie van VROM om DLO-Staring Centrum een studie op te dragen naar mogelijkheden voor en een aanzet tot een methode voor de keuze van locaties op basis van die bepalingen. Daarbij moest de bestaande geologische, geohydrologische, hydrologische en bodemkundige informatie worden gebruikt en moest de methode in een GIS-omgeving operationeel kunnen worden gemaakt. Als zodanig kan de methode fungeren als hulpmiddel bij de ruimtelijke planvorming op regionale schaal.

### ***Locatie-eisen***

Een locatie geldt als ongunstig als zelfs bij extra isolerende voorzieningen a) het bereikt bodembeschermingsniveau onvoldoende is; b) de situatie bij het falen van (onderdelen van) het isolatiesysteem onbeheersbaar wordt en c) controle op effectiviteit van het isolatiesysteem onmogelijk is.

Locaties die geschikt zijn vanuit het oogpunt van bescherming van de bodem, voldoen aan:

- 1 een minimale afstand tussen stortzool en gemiddeld hoogste grondwaterniveau van 0,70 m;
- 2 beperkte omvang van verspreiding van stoffen in de bodem;
- 3 signaleringstijd van lekken korter dan vijf jaar;
- 4 zetting van de ondergrond onder het stort minder dan 0,25 m;
- 5 beheersbaarheid van calamiteiten en grote lekken.

### ***Droogleggingscriterium***

Een stortterrein beïnvloedt het oorspronkelijke grondwaterregime. Regen kan niet meer in de bodem infiltreren en de ontwateringsmiddelen (greppels, sloten, drains) worden verstoord, waardoor afvoermogelijkheden verslechteren. Het grondwaterregime onder de stort wordt dan bepaald door het regime in het ernaast gelegen terrein. In kwelgebieden zal het gemiddeld grondwaterniveau onder de stort stijgen, in wegzijgingsgebieden dalen en in de overige gebieden onveranderd blijven. Gebieden met een kwel van meer dan  $0,001 \text{ m.d}^{-1}$  zijn daarom minder geschikt.

De totale dikte van de drainlaag onder het afval en de minerale afdichting bedraagt minstens 0,8 m. Zolang de zetting van de ondergrond beperkt blijft ( $< 0,3 \text{ m}$ ), wordt aan de droogleggingseis (afstand stortzool tot GHG  $> 0,7 \text{ m}$ ) bij alle grondwatertrappen voldaan.

### ***Criterium voor verspreiding van stoffen***

Verspreiding van stoffen wordt bepaald door a) de dikte van de onverzadigde zone (verticale verplaatsing); b) de aanwezigheid van kwel (leidt verontreinigingen af naar het oppervlakte water); c) de dikte van het Holocene pakket (remt verspreidingssnelheid) en d) de dikte en stroomsnelheid in het watervoerend pakket (horizontale en verticale verspreiding). Het gunstigst zijn kwelgebieden waar verspreiding in de bodem beperkt blijft. Gebieden met grondwatertrap I t/m III in het oostelijk deel van Nederland zijn in het algemeen zulke gebieden. In droogmakerijen in West-Nederland komt kwel voor bij grondwatertrap IV en hoger. Gebieden met een sterke stijghoogtegradiënt in het watervoerend pakket en pakketdiktes van meer dan 10 m, zijn in het algemeen minder geschikt.

### ***Criterium voor lekdetectie***

Lekkages moeten binnen een termijn van vijf jaar kunnen worden gesignaleerd. Daartoe worden horizontaal gelegde controledrains onder de stort enkele keren per jaar afgepompt en wordt de waterkwaliteit bepaald. De verblijftijd van stoffen tussen stortzool en drains wordt bepaald door de dikte van de onverzadigde zone (~ afstand stortzool tot gemiddelde grondwaterstand) en de aanlegdiepte van controledrains. Om de drains te kunnen afpompen dienen deze onder de gemiddeld laagste grondwaterstand te liggen. Op zandgronden voldoen gebieden met grondwatertrap t/m IV, op leemhoudende zanden grondwatertrap t/m II en kleigronden met grondwatertrap I. Wordt echter op deze laatste gronden een deel van de bovengrond ontgraven, dan is een grondwatertrap t/m III ook bruikbaar.

### ***Zettingscriterium***

De stabiliteit (zettingsgevoeligheid) wordt bepaald door het voorkomen van samendrukbare lagen (bijvoorbeeld ongerijpte klei, venige klei en veen). Gebieden met slappe kleilagen met een dikte van meer dan één meter voldoen niet aan de zettingseis ( $< 0,25 \text{ m}$ ). In het Holocene en de Formaties van Sinkgraven, Asten en Griendtsveen komen slappe lagen met een relatief grote dikte voor en zijn daarom minder of niet geschikt.

### ***criterium voor beheersbare situaties***

Om omvangrijke verspreiding van stoffen in de bodem te beheersen bij falende isolerende voorzieningen, kunnen enkele maatregelen worden getroffen: hydrologische isolatie en civieltechnische voorzieningen (verticale schermen). Bij een hydrologische isolatie wordt het grondwaterniveau onder en vlak naast de stort verlaagd, waardoor de grondwaterstroming gericht is naar de stort. Om te voorkomen dat verontreiniging via dispersie naar diepere lagen verdwijnt, moet het pompfilter op een bepaalde diepte zijn aangebracht, afhankelijk van de afmeting van de stort. Deze diepte is groter naar mate de afmetingen groter zijn. De dikte van het watervoerend pakket moet daarvoor 10-20 m zijn.

Verticale schermen zijn effectief als ze tot in een dichte laag reiken. Om bouwtechnische redenen is de aanlegdiepte van schermen tot 30 m beperkt. Scheidende (slecht-doorlatende) lagen moeten voor deze toepassing binnen 30 m onder maaiveld worden aangetroffen.

Onder calamiteiten kunnen ook (tijdelijke) overstromingen worden verstaan, zoals in 1993 zijn voorgekomen in het Maasdal. Bij stortplaatsen die in bedrijf zijn en kunnen onderlopen ontstaat dan een situatie waarin omvangrijke verspreiding van vaste en opgeloste stoffen kan optreden. Als echter in die situaties het afval met een laag grond wordt afgedekt, kan de schade beperkt blijven.

Voor afgesloten stortterreinen vormt overstroming een aanzienlijk geringer probleem. Wel kunnen extra zettingen optreden als gevolg van extra belasting op de afdeklaag omdat de afdichting indringing van water remt of voorkomt. Ten gevolge van de verhoogde waterspanning in de bodem kan grondwater van onderuit in het afval dringen. De onderafdichting voorkomt dit echter. Risico's voor het opbarsten van de onderafdichting worden door het gewicht van het afval ruimschoots gecompenseerd. Voor afgedichte stortterreinen wordt in geval van overstromingen geen schadelijk effect verwacht.

### ***Mogelijkheden voor GIS-toepassing***

Het proces van de locatiekeuze bestaat uit het afzonderlijk in kaart brengen van kenmerken voor de verschillende criteria. Elke kaart bevat een legenda voor de classificatie van de kenmerken. Op elke kaart worden (deel-)gebieden gemarkeerd, waar de kenmerken voldoen aan de criteria. Gemarkeerde gebieden, of delen daarvan, waar is voldaan aan alle criteria, zijn potentieel geschikt voor het aanleggen van afval- en reststofbergingen.

Voor toepassing van het keuzeproces in een GIS-omgeving dient de relevante ruimtelijke informatie in gedigitaliseerde vorm beschikbaar te zijn. Uiteraard kan men ook transparante kaarten over elkaar leggen en (deel-)gebieden markeren die aan de criteria voldoen. Ruimtelijke informatie is nodig over:

- bodem en grondwatertrappen;
- gemiddelde grondwaterstand;
- doorlatendheid eerste aquifer;
- stijghoogteverdeling in de eerste (en tweede) aquifer;
- dikte van het eerste watervoerend pakket;



- diepte en hydraulische weerstand eerste scheidende laag;
- geologische formaties (zettingsgevoelige lagen en zettingsconstanten);
- topologie.

De grondwatertrappen verschaffen geen informatie over de gemiddeld laagste grondwaterstand voor grondwatertrap VII en VII\* en geven verder alleen een globale indicatie van kwel en wegzijging. Bij toepassing van de methode op provinciaal niveau kan beter gebruik worden gemaakt van de kwel- en wegzijging die voor het opstellen van provinciale waterhuishoudings- of waterbeheersplannen is geïnventariseerd of afgeleid.

Informatie over stijghoogteverdeling in de verschillende watervoerende pakketten en de opbouw van de bodem is beperkt aanwezig.

De geologische kaart is nog niet voor geheel Nederland gereed en bevat bovendien geen informatie over zettingsconstanten. Ook de informatie over de opbouw van de bovenste 10-20 m is niet optimaal. In deze studie is daarom een kwalitatieve indeling gemaakt van geologische formaties, die niet-, matig- of zettingsgevoelig zijn. Zettingsgevoelige gebieden worden uitgesloten.

De uitwerking van het model met behulp van het Geografisch Informatie Systeem ARC-INFO is goed mogelijk. Dit pakket werkt uitsluitend met kenmerken (attributen) van kaartvlakken. Door de beperkte rekenmogelijkheden van dit pakket moet nog veel handwerk worden verricht om lijninformatie (bijvoorbeeld isohypsen) te transponeren naar vlakinformatie. Met de nieuwe versie 6.1 van ARC-INFO kan de optie voor een vaste gridindeling worden gebruikt, waardoor deze omzetting eenvoudiger wordt. De gebruikersvriendelijkheid van dit pakket is nog niet erg groot en vereist specialistische kennis.

Het digitaliseren van kaarten en het invoeren van gebiedskenmerken is tijdrovend.

Voor toekomstige toepassing is het aan te bevelen om gebiedskenmerken in klassen in te delen vanaf niet-geschikt tot geschikt en de geschiktheidsklassen te combineren met pakketten van maatregelen en voorzieningen waarmee de bodembescherming naar het niveau op de referentie-locatie volgens de nieuwe regelgeving, kan worden gebracht.

## 1 Inleiding

In Nederland wordt jaarlijks ca. 60 miljoen ton afval geproduceerd, exclusief de mest en baggerspecie (CBS, 1990). De overheid dringt de jaarlijks te storten hoeveelheid afval terug door afvalvorming te voorkomen (preventie), door hergebruik en nuttige toepassingen (nu gezamenlijk ca. 10%) te bevorderen en brandbaar afval te verbranden (nu ca. 35%) (Adriaanse, 1991). Ondanks deze inspanning zal ook in de toekomst afval worden gestort en zal er behoefte blijven bestaan aan stortterreinen. Op het moment wordt, exclusief de baggerspecie ca. 15 miljoen ton gestort, waarvoor jaarlijks 40-80 ha stortterrein nodig is. Uitgaande van de trend naar grote regionale stortterreinen met een hoog voorzieningenniveau, betekent dit dat gemiddeld ongeveer elke twee jaar een nieuw regionaal stortterrein in gebruik moet worden genomen.

Het Ministerie van VROM heeft DLO-Staring Centrum in 1993 een opdracht verleend om te onderzoeken op welke wijze en op basis van welke informatie de geschiktheid van gebieden voor de vestiging van stortplaatsen kan worden vastgesteld. Daarbij is uitgesproken dat op relatief eenvoudige wijze met gebruikmaking van de beschikbare geologische en geografische informatie- en presentatiesystemen, de resultaten van het zoekproces in kaart moeten worden gebracht. Dit rapport betreft een voorstudie naar mogelijkheden en een aanzet tot een methodiek voor zo'n proces.

De inrichting en beheer van stortterreinen moet voldoen aan wettelijk vastgelegde eisen, samengevat als IBC-criteria. Dit betekent dat afval geïsoleerd van de omgeving moet worden opgeslagen en dat verontreiniging van de bodem, grond- en oppervlaktewater en de atmosfeer wordt voorkomen. Als ten gevolge van onvoorziene oorzaken toch emissie van verontreinigingen vanuit het afval naar de omgeving optreedt, moet de situatie beheersbaar blijven, zodat verdere verspreiding van stoffen wordt voorkomen. Tenslotte moeten de terreinen zo zijn ingericht, dat controle op het functioneren van isolerende voorzieningen mogelijk is.

Door Boels et al. (1993) is aangetoond dat de lokale geohydrologische omstandigheden grote invloed hebben op de omvang van verspreiding van stoffen in het grondwater en ook op de signaleringstijd van lekken in afdichtingsconstructies. Aannemelijk is gemaakt dat gelet op de duurzaamheid van isolerende constructies, bepaalde locaties beter geschikt zijn dan andere (Boels, 1993). Vanuit het oogpunt van de bescherming van de bodem zijn bepaalde locaties ongeschikt.

Het toedelen van functies aan gebieden vereist een systematische afweging van belangen en behoort tot de taak van de ruimtelijke ordening waarvoor de planvorming het belangrijkste beleidsinstrument is. Verschillende niveaus van planvorming kunnen worden onderscheiden: nationaal niveau (Vierde Nota Ruimtelijke Ordening), provinciaal niveau (streekplan) en gemeentelijk niveau (bestemminsplan en eventueel structuurplan). Met betrekking tot potentiële locaties voor afval- en reststofbergingen zijn in de verschillende plannen vrijwel geen dwingende criteria opgenomen.

Het aanwijzen van nieuwe locaties voor stortterreinen vergt de afweging van belangen van planologische, verkeerskundige, financieel-economische en algemene milieuhygiënische aard en van het belang van de volksgezondheid. Behalve de financieel-economische aspecten worden deze in het Milieu Effect Rapport (MER) opgesomd en de effecten van de voorgenomen activiteit gekwantificeerd. Voor echter met het opstellen van een ('inrichtings') MER kan worden begonnen, moet de locatie bekend zijn. De afweging van factoren die bij de keuze van een locatie van belang zijn, is ingebed in een democratische procedure.

In principe wordt het ruimtelijke ordeningsbeleid en milieubeleid geïntegreerd door afstemming tussen nationale (NMP, VINEX) en provinciale plannen (PAP, streekplan). Uiteindelijk zal de gekozen locatie worden opgenomen in gemeentelijke bestemmingsplannen.

Op initiatief van het Afvaloverlegorgaan heeft de Katholieke Universiteit van Nijmegen op basis van verschillende studies een locatiekeuzemodel ontwikkeld waarin de criteria worden verhelderd en de prioriteitsstellingen en weging inzichtelijk wordt gemaakt (Gijsberts, 1992). Dit model onderscheidt een uitsluitende fase, waarin gebieden voor de vestiging van stortterreinen worden uitgesloten (bijvoorbeeld steden, natuurgebieden, ecologische hoofdstructuurgebieden, drinkwaterwingebieden etc.); een beperkende fase, waarin op grond van minder 'harde' criteria gebieden op hun geschiktheid worden beoordeeld (bijvoorbeeld nabijheid water- en spoorwegen, bebouwde gebieden, vliegveld, ongunstige geohydrologische of bodemkundige situatie, Groene en Blauwe koersgebieden etc.); en een rangschikkende fase waarin een groot aantal criteria (onder andere milieuhygiënische, ruimtelijke, juridisch-bestuurlijke etc.) zijn opgenomen die de overblijvende zoekruimte tot enkele locaties beperken.

Door de Rijksplanologische Dienst en het ingenieursbureau Haskoning is een locatiekeuzeprocedure ontwikkeld, die lijkt te zijn afgeleid van de methode van Gijsberts en voor computertoepassing geschikt is gemaakt. Deze procedure staat bekend als de 'Back Yard Verkenner' (Idema en Schuur, 1992). Hier is de beperkende fase opgesplitst in een beperkende fase A, waarin een '...zorgvuldig gebruik van de Nederlandse bodem' wordt gegarandeerd, een fase B-push, waarin bepaalde ruimtelijke functies worden gemedend (bijvoorbeeld geen stortterrein naast een recreatieterrein), en een fase B-pull, waarin aansluiting wordt gezocht bij bestaande ruimtelijke functies.

Door Striegel (1993) is voor het zoeken van een locatie voor chemisch afval in Noordrijn-Westfalen een procedure ontworpen waarin drinkwaterwingebieden, natuurterreinen, bebouwde gebieden, mijnstreken, en geohydrologisch ongunstige gebieden worden uitgesloten. In de overblijvende zoekruimte worden gebieden aangewezen waarin het bovenste pakket een bepaalde minimum dikte en een maximale (zeer geringe) doorlatendheid heeft. De stroomsnelheid in het onderliggend watervoerend pakket moet gering zijn om verspreiding van eventuele lekken te beperken. Deze methode berust op het principe van geohydrologische isolatie en selecteert op basis van drie criteria (dikte, doorlatendheid en stroomsnelheid) geschikte locaties in de overgebleven zoekruimte.

In het door Gijsberts ontwikkeld beslissingsondersteunend model komen de aspecten met betrekking tot de bodembescherming slechts summier aan de orde. Sinds het na te streven bodembeschermingsniveau is gekwantificeerd (Ter Hoeven en Sluimer, 1993) en een wettelijke basis heeft gekregen, kan ook het zoekproces beter gekwantificeerd en mogelijk geformaliseerd verlopen.

In hoofdstuk 2 is de samenhang tussen het provinciaal ruimtelijk beleid, de 'locatie'-MER en de 'inrichtings'-MER uiteengezet en is aangegeven in welke fase van ruimtelijke planvormingen de te ontwikkelen methode kan worden toegepast. Ook is ingegaan op de eisen waaraan locaties van stortterreinen volgens de huidige wet- en regelgeving moeten voldoen en zijn de meest relevante bodemkundige en geohydrologische criteria besproken. Daarbij is aandacht besteed aan de samenhang tussen deze kenmerken en isolerende voorzieningen. In hoofdstuk 3 is een werkwijze ontwikkeld waarbij aan bestaande kaarten (geologische kaart, bodemkaart en hydrologische kaarten) gebieds-kenmerken worden ontleend en vertaald naar kengetallen die representatief zijn voor die kenmerken in een bepaald gebied. Deze kenmerken vormen de attributen van kaartvlakken, die met het software pakket ARC-INFO be- en verwerkt kunnen worden (combineren van attributen en kaartvlakken) tot beleidsondersteunende kaarten. In hoofdstuk 4 is de toepassing beschreven van de ontwikkelde methode in een gebied tussen Oisterwijk en Driessen.

## **2 Methodiek locatiekeuze**

### **2.1 Doel locatiekeuze**

Het doel van het keuzeproces is om een locatie te vinden die voldoet aan de eisen voor locaties van afval- en reststof bergingen en aan eisen voor een haalbare 'eeuwig durende' nazorg van afgesloten stortterreinen. De belangrijkste eis betreft de bescherming van de bodem en het grondwater, waarbij volgens de considerans van de Afvalstoffenwet rekening moet worden gehouden met de aan te houden afstand tot terreinen met essentiële waarden van landschappelijke, geologische, historische of ecologische aard (Gijsberts, 1991). Milieuhygiënische, politieke en maatschappelijke aspecten spelen een rol als uit een aantal potentiële geschikte locaties een definitieve moet worden gekozen; gebieden met een ongunstige geohydrologische en of bodemkundige situatie zijn dan al uitgesloten.

Bij de ruimtelijke planvorming op provinciaal niveau kunnen een aantal fasen worden onderscheiden met betrekking tot de keuze van locaties voor afval- en reststofbergingen. De eerste fase betreft het aangeven van gebieden die op grond van bodemkundige en geohydrologische kenmerken geschikt zijn voor de vestiging van afval- en reststofbergingen. Het aanwijzen of zoeken naar een definitieve locatie behoort onder de werkingssfeer van een 'locatie'-MER, waarvoor vaak meer gedetailleerde informatie nodig is dan op bestaande kaarten beschikbaar is. Op grond van de bevindingen in deze MER kunnen de gemeentelijke bestemmingsplannen worden aangepast en criteria waaraan een stortterrein behoort te voldoen kunnen er aan worden ontleend.

De te ontwikkelen methodiek is bedoeld voor de eerste fase en leidt tot een beleidskaart waarop vanuit het oogpunt van de bodembescherming potentieel geschikte gebieden zijn aangegeven. De methodiek hoort in de locatiekeuze-systematiek volgens Gijsberts thuis in de inperkende fase. In het volledig keuzeproces kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:

- 1 uitsluiten van gebieden op grond van belangen van landschappelijke, natuurwetenschappelijke, ecologische en recreatieve of woonmilieu-technische aard;
- 2 inperken van de resterende gebieden vanuit de invalshoek van bodembescherming;
- 3 afweging van potentiële locaties op grond van daartoe geëigende procedures, bijvoorbeeld een 'locatie'-MER, waarin alle aspecten een rol spelen;
- 4 beoordelen milieu-effecten van alternatieven voor de inrichting en voorzieningen op een bepaalde locatie; hiervoor is vaak een 'inrichtings'-MER nodig.

De laatste stap behoort strikt genomen niet meer tot het zoekproces, tenzij het bevoegd gezag of de aanvrager van het MER heeft bepaald dat (een) andere locatie(s) geëvalueerd moet(en) worden.

De te ontwikkelen methode betreft het aangeven van gebieden met gunstige bodemkundige en geohydrologische eigenschappen. Een locatie geldt in dit verband als ongunstig als zelfs bij extra isolerende voorzieningen (Ter Hoeven en Sluimer, 1993):

- het bereikt bodembeschermingsniveau onvoldoende is;
- de situatie bij het falen van (onderdelen van) het isolatiesysteem onbeheersbaar wordt;
- controle op effectiviteit van het isolatiesysteem onmogelijk is.

## **2.2 Bodembeschermingsniveau**

Onder het bodembeschermingsniveau wordt een situatie verstaan waarin bij een bepaalde combinatie van technische voorzieningen en locatie-eigenschappen een bepaalde hoeveelheid stoffen uit het afval naar de bodem emiteert en zich na een bepaald aantal jaren over een bepaald bodemvolume heeft verspreid (volume verontreinigde bodem per oppervlakte-eenheid stortplaats); eventuele lekkages worden na een bepaald aantal jaren via het controle systeem gesignaleerd (signaleringsstijd).

Er bestaat geen objectieve maat voor het bodembeschermingsniveau. Geëist wordt dat isolerende voorzieningen met de beste materialen en technieken volgens meest recente inzichten worden aangelegd.

Op het moment wordt aangenomen dat de beste isolatie wordt verkregen met een combinatie-afdichting van geomembranen en minerale afdichtingslagen waardoor emissies naar de bodem beperkt blijven tot ca. 0,005 m per jaar (Boels, 1993). Het volume grond dat eventueel verontreinigd kan raken is afhankelijk van de geohydrologische gesteldheid en de omvang van de emissie. In kwelgebieden blijft dit volume beperkt. De zetting van de ondergrond moet tot enkele decimeters beperkt blijven om defecten in de afdichtingslagen en perkolaat- en controledrains te voorkomen.

Als referentie-beschermingsniveau geldt een combinatie-onderafdichting van 2 mm geomembraam op een minerale afdichtingslaag van 0,5 m. Op het geomembraam rust een drainagelaag van 0,5 m met een percolaat-onttrekkingssysteem (Ter Hoeven en Sluimer, 1993). Na beëindigen van de stortactiviteiten, wordt een afvalstort voorzien van een (combinatie) bovenafdichting, die evengoed isoleert als de onderafdichting. De afstand tussen 'stortzool' (=bovenzijde drainagelaag) en de gemiddeld hoogste grondwaterstand moet minsten 0,7 m bedragen (Uitvoeringsregeling Stortbesluit Bodembescherming, 1 maart, 1993; Ter Hoeven en Sluimer, 1993).

## **2.3 Beheersbaarheid situaties**

Onder beheersbaarheid wordt de mogelijkheid verstaan om met eenvoudige ingrepen verspreiding van stoffen in de bodem te stoppen of tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. De lokale situatie moet dan zodanig zijn dat de oorzaak van de bodemverontreiniging (lek, calamiteit) tijdig kan worden gesignaleerd en dat de bodemkundige en geohydrologische gesteldheid eenvoudige, effectieve en relatief goedkope ingrepen mogelijk maakt of van nature verspreiding van stoffen beperkt.

**Tabel 1 Omvang bodemverontreiniging ( $m^3$  bodem per  $m^2$  stortterrein) na 1000 jaar in samenhang met de kwaliteit van isolerende voorzieningen (percolaatverlies,  $m \cdot j^{-1}$ ) (naar Boels et al., 1993)**

Locatietype	Lekverlies percolaat ( $m \cdot j^{-1}$ )		
	0,005	0,020	0,350
			(=neerslag-overschot)
zandgebied, diep grondwater	25	75	900
zandgebied, hellend dik watervoerend pakket, beperkte gebiedsstroming	5	18	310
zandgebied, hellend dik watervoerend pakket, relatief grote gebiedsstroming	2,5	10	180
geen gebiedsstroming, matig dik watervoerend pakket, zeer slecht- doorlatende basis	18	55	290
kwel, relatief dun, watervoerend pakket, beperkte gebiedsstroming	0,1	1	7
beperkte kwel, geen gebiedsstroming, relatief dun watervoerend pakket, relatief grote doorlatendheid	0,6	9	30
zeer beperkte kwel, geen gebiedsstroming, relatief dun watervoerend pakket, relatief geringe doorlatendheid	4		13 (stroming naar 2 <sup>e</sup> -aquifer)
wegzijgingsgebied, dun watervoerend pakket, geen gebiedsstroming			(stroming naar 2 <sup>e</sup> aquifer)

Uit een onderzoek naar de omvang van verspreiding van stoffen uit afval- en reststofbergingen in de bodem (Boels et al., 1993), blijkt dat de omvang van de bodemverontreiniging bepaald wordt door de geohydrologische situatie en de mate waarin de isolerende voorzieningen (nog) functioneren. De omvang van bodemverontreiniging is vooral groot in gebieden met diepe grondwaterstanden en een beperkte (horizontale) gebiedsstroming en een dik watervoerend pakket. Zulke verontreinigingen zijn niet meer te herstellen. Weinig bodemverontreiniging wordt verwacht in gebieden met een relatief grote kwel. Weglekkende verontreiniging wordt vrij snel naar het oppervlaktewater afgevoerd, waar het kan worden gesignaleerd en behandeld, in tegenstelling tot de hiervoor genoemde gebieden. Tabel 1 geeft voor enkele sterk geschematiseerde situaties de omvang van bodemverontreiniging weer na 1000 jaar.

In principe kan de kans op bodemverontreiniging worden beperkt met extra technische maatregelen. Door Boels (1993) is voor verschillende locaties die afwijken van de referentie locatie, aangegeven welke extra voorzieningen kunnen worden toegevoegd aan het standaardpakket. Tevens is van een aantal, sterk geschematiseerde hydrologische situaties de geschiktheid voor afval- en reststofbergingen bepaald. Deze geschiktheid is gebaseerd op een kwalitatieve risico-beoordeling en heeft betrekking op de situatie waarin als extra voorzieningen zijn aangebracht (tabel 2).

Uit tabel 1 en 2 blijkt dat de omvang van de verspreiding in kwelgebieden beperkt blijft, terwijl ook de dikte en stroomsnelheid in het watervoerend pakket invloed heeft. Verder blijkt dat indien de isolerende voorzieningen op peil worden gehouden, in het algemeen de omvang van de bodemverontreiniging beperkt blijft.

Afgesloten stortterreinen vormen nog langdurig een milieu-risico (Boels and Flemming, 1992) en moeten daarom nog langdurig worden beheerd ('eeuwig' durende nazorg). Op het moment worden hiervoor regelingen voorbereid. Hoe lang dit beheer moet duren is onbekend. Voor de verre toekomst zal men er vanuit moeten gaan dat als gevolg van maatschappelijke, politieke of klimatologisch ontwikkelingen het beheer ophoudt en dat de afdichtingslagen hun functie verliezen. Dan spelen de lokale omstandigheden een grote rol bij de omvang van de bodemverontreiniging.

Door Ter Hoeven en Sluimer (1993) is op basis van de studie van Boels et al. (1993), een referentielocatie gedefinieerd waar de omvang van bodemverontreiniging gering is als isolerende voorzieningen falen. Op die locatie is de kwel zo groot dat transport van opgeloste verontreiniging naar de tweede aquifer wordt voorkomen. Om ook transport door diffusie tegen te gaan is volgens Boekelman (1985) een opwaarts gerichte stroming nodig die gemiddeld groter is dan  $0,1 \text{ mm.d}^{-1}$  ( $0,035 \text{ m.j}^{-1}$ ). Verder moet de dikte van het eerste watervoerend pakket geringer zijn dan 10 m. Om verstoring van controle- en percolaatdrains te voorkomen en om de kans op breuken in de onderafdichtingsconstructie te beperken moet volgens Ter Hoeven en Sluimer (1993) de zetting kleiner zijn dan 0,25 m. De omvang van de bodemverontreiniging op deze locatie blijft beperkt als de isolerende voorzieningen falen.

Ook komen wegzijgingsgebieden in aanmerking waar een relatief dik holocene pakket (klei/veen) wordt aangetroffen, als het beheer van gesloten stortterreinen gewaarborgd is. Bij het ontwerp van de onderafdichtingsconstructie moet dan wel rekening worden gehouden met mogelijkheden voor een hydrologische isolatie. Enkel principe oplossingen hiervoor zijn door Boels, 1993, uitgewerkt.



**Tabel 2 Locatiekenmerken, risico's en geschiktheid (naar Boels, 1993)**

Locatietype	locatiekenmerk	risico	geschiktheid
Zettingsgevoelig	Samendrukb. lagen op watervoerend pakket. Na consolidatie zeer geringe doorl.h.	Onvoldoende drooglegging, bezwijken afdichtingen, drainbuizen	Ongeschikt bij grote en ongelijkmatige zetting
Zeer diep grondw.	Goed doorl. grond, grondwater diep, beperkte gebiedsstroming, inzijging.	Diepe oncontroleerbare omvangrijke bodemverontreiniging	Ongeschikt
Hellende zandgeb.	Goed doorl. grond ondiepe grondw. significante gebiedsstroming, inzijging.	Ondiepe oncontroleerbare verontreiniging stroomafwaarts	Matig
Vlak zandgebied	Goed doorl. grond ondiep grondw. intensieve detail ontw. relatief geen kwel/wegzijging, geen gebiedsstroming.	Lokale oppervlaktewaterverontreiniging; onder stort relatief diep doordringende verontreiniging	Redelijk
Wegzijgingsgebied	Slecht doorl. bovengrond op watervoerend pakket, beperkte gebiedsstroming	Op zeer lange termijn verspreiding in watervoerend pakket	Redelijk
Kwelgebied	Goed/slecht-doorl. bovengrond, ondiep grondw., kwel naar intensieve detailontwatering	Lokale oppervlaktewaterverontreiniging; beperkte drooglegging	Goed
Groeven/afgravingen boven grondwater	Vergelijkbaar met zandgeb. met diep grondw.	Omvangrijke verspreiding; oncontroleerbaar	Slecht
Groeven/afgravingen onder grondwater	Locatie-afhankelijk	Omvangrijke verspreiding bij gebiedsstroming anders verspreiding door diffusie	Slecht

## 2.4 Effectiviteit controlerende voorzieningen

De artikelen 11 en 12 van het Stortbesluit Bodembescherming (Staatsblad 1 maart, 1993) schrijven inspectie van bodembeschermende voorzieningen en de hoedanigheid van de bodem voor. Deze artikelen zijn in de 'Uitvoeringsregeling Stortbesluit Bodembescherming' verder uitgewerkt. De 'Richtlijn drainagesystemen en controlesystemen grondwater voor stort- en opslagplaatsen' (Ter Hoeven et al., 1993) behandelt de hydrologische en hydraulische aspecten van controledrains en -putten voor grondwaterkwaliteitsmonitoring rond afval- en reststofbergingen.

Voor controle op de kwaliteit van het grondwater onder afvalstortplaatsen worden drainbuizen horizontaal en op een zekere onderlinge afstand aangelegd. Deze buizen monden onder water uit. Een aantal keren per jaar worden de drains afgepompt en wordt de waterkwaliteit per drain gemeten. Dit controle systeem moet zijn ontworpen voor

een signaleringstijd van minder dan vijf jaar. De signaleringstijd is de tijd die verloopt tussen het moment waarop een deeltje door de afdichting gaat tot het moment waarop dit voor het eerst in het monitoringssysteem wordt aangetroffen. Deze periode is vooral relevant direct na de aanleg van nieuwe stortterreinen. Bij defecten of tekortkomingen in isolerende voorzieningen tengevolge van ontwerp- of uitvoeringsfouten kunnen de ontwerpers cq. aannemers volgens resp. de 'Regeling van de Verhouding tussen Opdrachtgever en adviserend Ingenieursbureau' (RVOI), van 1987 en de 'Uniforme Administratieve Voorwaarden voor uitvoering van werken' (UAV) van 1989, aansprakelijk worden gesteld tot hooguit 5 jaar na oplevering van het werk.

## **2.5 Keuze criteria**

Gebieden waar vanuit het oogpunt van de bescherming van de bodem afval- en reststofbergingen gevestigd kunnen worden behoren te voldoen aan:

- 1 een minimale afstand tussen stortzool en gemiddeld hoogste grondwaterniveau;
- 2 beperkte omvang van verspreiding van stoffen in de bodem;
- 3 signaleringstijd van lekken korter dan vijf jaar;
- 4 zetting van de ondergrond onder het stort minder dan 0.25 m;
- 5 een beheersbare situatie bij het optreden van calamiteiten en grote lekken.

Een locatie is geschikt als aan alle criteria is voldaan. Andere locaties zijn bruikbaar als daar via extra maatregelen en voorzieningen een zelfde niveau van bodembescherming kan worden bereikt als op de referentie locatie.

### 3 Kengetallen

#### 3.1 Drooglegging afval

De stortzool moet volgens de huidige Richtlijn minstens 0,7 m boven de gemiddeld hoogste grondwatervlucht (GHG) liggen. Omdat aan de onderzijde van afvalstorten een minerale afdichting van 0,5 m en een drainlaag van 0,3 m is voorgeschreven, mag de GHG tot 0,1 m in de afdichtingslaag reiken.

Door het aanleggen van een stortterrein wordt het grondwater niet meer gevoed en wordt het grondwaterregime onder de stort bepaald door het regime in het aangrenzend terrein.

Om de invloed van het wegvallen van de voeding van het grondwater op het verloop van de grondwaterstanden onder de stort te benaderen, nemen we aan dat het grondwatervlucht in het aangrenzend terrein sinusoïdaal verloopt rond een gemiddeld niveau. Het verloop van de grondwatervlucht op een willekeurige plaats onder het stortterrein kan dan analoog aan het temperatuursverloop in de bodem, volgens Carslaw and Jaeger (1959), worden beschreven:

$$H(x,t) = H_g + H_a e^{-\frac{x}{B}} \sin(\omega t - \frac{x}{B}) \quad (1)$$

Hierin is:

$H(x,t)$	= grondwatervlucht onder stort op $x$ m van de rand op tijdstip, $t$	(m)
$H_g$	= gemiddeld grondwatervlucht	(m)
$H_a$	= amplitude grondwatervlucht in aangrenzend gebied	(m)
$x$	= afstand tot rand stortterrein	(m)
$B$	= $(2kD \cdot \omega^{-1} \cdot \mu^{-1})^{1/2}$	
$kD$	= transmissiviteit aquifer	( $m^2 \cdot d^{-1}$ )
$\omega$	= hoeksnelheid (= $2\pi/365$ )	( $rad \cdot d^{-1}$ )
$\mu$	= effectieve bergingscapaciteit	( $m^3 \cdot m^{-3}$ )

Bij een  $kD = 10 \text{ m}^2 \cdot d^{-1}$  en een effectieve bergingscapaciteit van 0,05 is de relatieve amplitude van het verloop van het grondwatervlucht op 50 m van de rand 72% van de amplitude aan de rand, op 100 m ca. 50%, op 200 m ca. 25% en op 250 m nog 20%. Daarnaast treedt een faseverschuiving op. Het hoogste grondwatervlucht wordt op 50 m ca. 20 dagen na het hoogste grondwatervlucht aan de rand bereikt. Op 100 m is dit 40 dagen; op 200 m, 75 dagen en op 250 m, 95 dagen. Met dit verschijnsel zal men ook rekening moeten houden bij het bemonsteren van controledrains.

De gemiddelde afname van de amplitude van het verloop van het grondwatervlucht is afhankelijk van de bodemopbouw en -eigenschappen. Voor het bovengenoemd voorbeeld bedraagt deze afname ca. 50% bij een stortterrein van 25 ha, 60% bij 50 ha en 70% bij 100 ha.

**Tabel 3 Indeling grondwatertrappen**

gwtr	I	II	III	IV	V	VI	VII
GHG	<20	<40	<40	>40	<40	40-80	>80
GLG	<50	50-80	80-120	80-120	>120	>120	>160

De amplitude is bij benadering gelijk aan de helft van het verschil tussen de gemiddeld hoogste en de gemiddeld laagste grondwaterstand. Het gemiddelde grondwaterniveau komt bij benadering overeen met het gemiddelde van beide extremen. In tabel 3 is hiervan voor verschillende grondwatertrappen een overzicht gegeven.

Geschat is dat voor grondwatertrap I het gemiddeld grondwaterniveau ca. 0,3 m en de amplitude ca. 0,15 m is; voor grondwatertrap II respectievelijk 0,5 m en 0,2 m; grondwatertrap III, 0,65 m en 0,35 m; grondwatertrap IV, 0,75 m en 0,25 m; grondwatertrap V, 0,85 m en 0,6 m; en voor grondwatertrap VI, 1,0 m en 0,5 m.

Door de aanleg van een stortterrein vervalt ook het bestaande ontwateringssysteem. Omdat ook de voeding (neerslagoverschot) wegvalt, heeft dit in het algemeen geen gevolgen. Alleen in kwel of wegzijgingsituaties kan het gemiddeld grondwaterniveau veranderen. Deze verandering kan worden benaderd met:

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{e_1}{e_2 \cdot H_a (H_a + N \cdot C)} - 1 \quad (2)$$

Hierin is:

- $\Delta H$  = afname gemiddelde grondwaterniveau (m)
- $H_o$  = gemiddelde grondwaterniveau, bestaande toestand (m)  
(t.o.v ontwaterings-basis)
- $H_a$  = stijghoogte in eerste watervoerend pakket t.o.v ontwateringsbasis (m)
- $e_{1,2}$  =  $\alpha_{1,2} + C^{-1}$
- $\alpha_{1,2}$  = drainage intensiteit ( $d^{-1}$ )
- $N$  = gemiddelde neerslagoverschot ( $m \cdot d^{-1}$ )
- $C$  = weerstand afdekkend pakket (d)
- 1,2 = indices voor situaties resp. voor en na aanleg stortterrein

Door het vervallen van het ontwateringssysteem neemt de drainage intensiteit af. Het gemiddeld grondwaterniveau stijgt bij een kwel van  $0,3 \text{ mm} \cdot d^{-1}$  en  $H_a = 0,5 \text{ m}$  met ca. 0,1 m, terwijl dit bij een kwel van  $1 \text{ mm} \cdot d^{-1}$  ca. 0,15 m is. Bij een wegzijging van  $0,3-1 \text{ mm} \cdot d^{-1}$  daalt het grondwaterniveau met ca. 0,4 m. De veranderingen van het gemiddeld grondwater niveau hangen dus sterk af van de lokale situatie.

Als de onderafdichtingsconstructie op het maaiveld wordt aangelegd, voldoet grondwatertrap I ook nog aan de droogleggingseis in kwelsituaties. Een zetting van ca. 0,3 m is in dat geval nog net toelaatbaar. Het gemiddeld hoogste grondwaterniveau is dan  $0,3$  ( huidig gemiddeld niveau) -  $0,5 \cdot 0,15 \text{ m}$  (reductiefactor\*amplitude) -  $0,25 \text{ m}$  (zetting) =  $-0,025 \text{ m}$ . De gemiddeld hoogste grondwaterstand komt in dit voorbeeld tot  $0,025 \text{ m}$  in de minerale afdichtingslaag.

Geconcludeerd kan hieruit worden dat de drooglegging onder de meeste omstandigheden kan worden gerealiseerd zolang de zetting beperkt blijft. Voor de globale verkenning van potentiële geschikte gebieden speelt de droogleggingseis geen rol. Dat is wel het geval als ook in zettingsgevoelige gebieden gezocht wordt.

### 3.2 Verspreiding van stoffen in de bodem

Stoffen die vanuit gestort afval in de bodem terechtkomen, verspreiden zich. De snelheid en omvang waarmee dit gebeurt hangt af van:

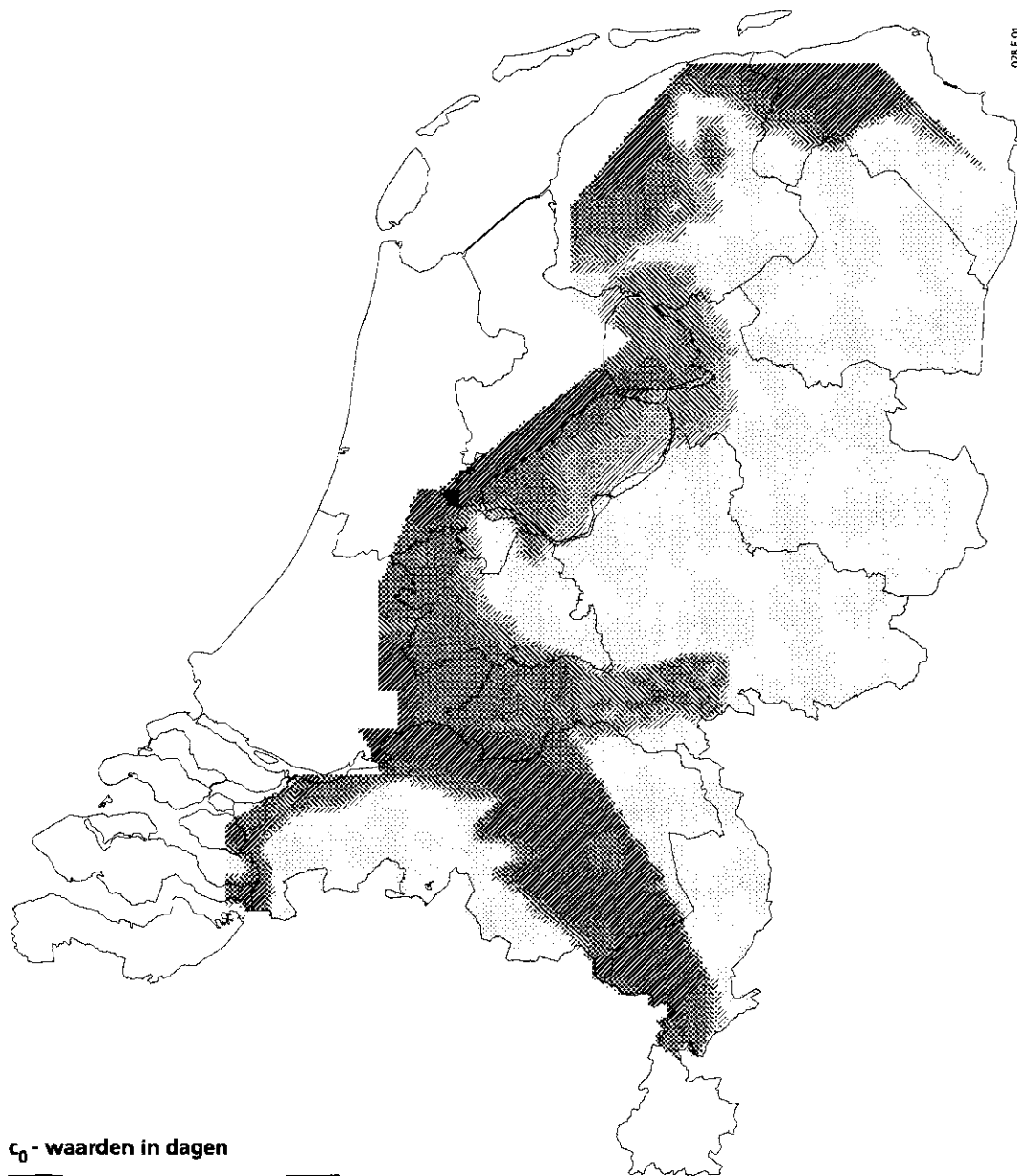
1 de dikte van de onverzadigde zone;

In de onverzadigde zone verplaatsen stoffen zich in verticale neerwaartse richting. De verblijftijd hangt samen met de grootte van het lek en de bodemopbouw en eigenschappen (onverzadigde doorlatendheid). De dikte van de onverzadigde zone kan worden afgeleid uit de grondwatertrap (tot en met VI). Bij zeer diepe grondwaterstanden raakt een dik grondpakket verontreinigd, terwijl dit niet zal worden gesignaleerd. De maximale dikte van de onverzadigde zone wordt bepaald door de vereiste signaleringstijd en kan uit de grondwatertrap worden afgeleid.

2 De aanwezigheid en eigenschappen van een afdekkend pakket (verzadigde zone). De stromingsweerstand (laagdikte/doorlatendheid) en porisiteit van het pakket bepaalt de transportsnelheid. Hierbij moet worden bedacht dat als gevolg van (geringe) zettingen de doorlatendheid sterk kan afnemen. De weerstand van het afdekkend pakket kan worden ontleend aan Pastoors, 1992 (fig. 1).

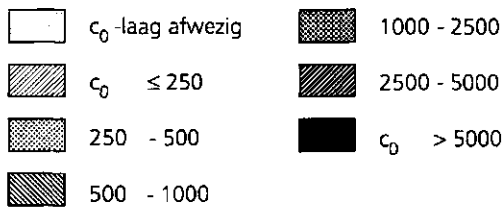
3 De stijghoogte in het watervoerend pakket en het freatisch niveau;

Als de stijghoogte in het watervoerend pakket groter is dan het freatisch niveau spreekt men van een kwelsituatie (opwaarts gerichte stroming), is de stijghoogte daarentegen lager, dan spreekt men van een wegzijgingssituatie. Wegzijging bevordert de transport en verspreiding van stoffen in de bodem. Kwel remt het transport van stoffen naar en in de bodem en leidt een lekstroom af naar het oppervlaktewatersysteem. Voor de bepaling van kwel of wegzijging is informatie nodig over 1) freatisch niveau; 2) drainage-intensiteit; 3) stijghoogte in eerste watervoerend pakket; en 4) de weerstand van het afdekkend pakket. Deze gegevens, behalve drainage-intensiteit kunnen worden ontleend aan de 'Grondwaterkaart van Nederland, Schaal 1 : 50 000, uitgave IGG-TNO Den Haag. Deze informatie is slechts incidenteel gedigitaliseerd. Bovendien vergt het bewerken van isolijnen in ARC-INFO een aparte bewerking voor er mee kan worden gemanipuleerd. Ook kan de omvang van de kwel en wegzijging worden ontleend aan Pastoors, 1992 (fig. 2) voor de situatie in het oostelijk deel van Nederland. De fluxen zijn berekend. Het model waarmee deze berekeningen zijn uitgevoerd, zal nog worden uitgebreid om de stroomsnelheid, stroombanen en stoftransport te kunnen berekenen (Pastoors, 1992). Een simpele, maar minder betrouwbare benadering is om het voorkomen van kwel te koppelen aan de grondwatertrap. Peerboom, 1990, laat aan de hand van simulaties zien dat bepaalde grondwatertrappen voor bepaalde bodems worden verkregen als gevolg van variaties in kwel en wegzijging. Voor de grondwatertrap I t/m III blijkt de kwel te variëren van ca.  $0,0015 \text{ m.d}^{-1}$  tot  $0,00015 \text{ m.d}^{-1}$ . Bij grondwatertrap V komt gedurende een deel van het jaar kwel voor en gedurende het ander deel wegzijging. Deze benadering geldt voor het oostelijk deel van

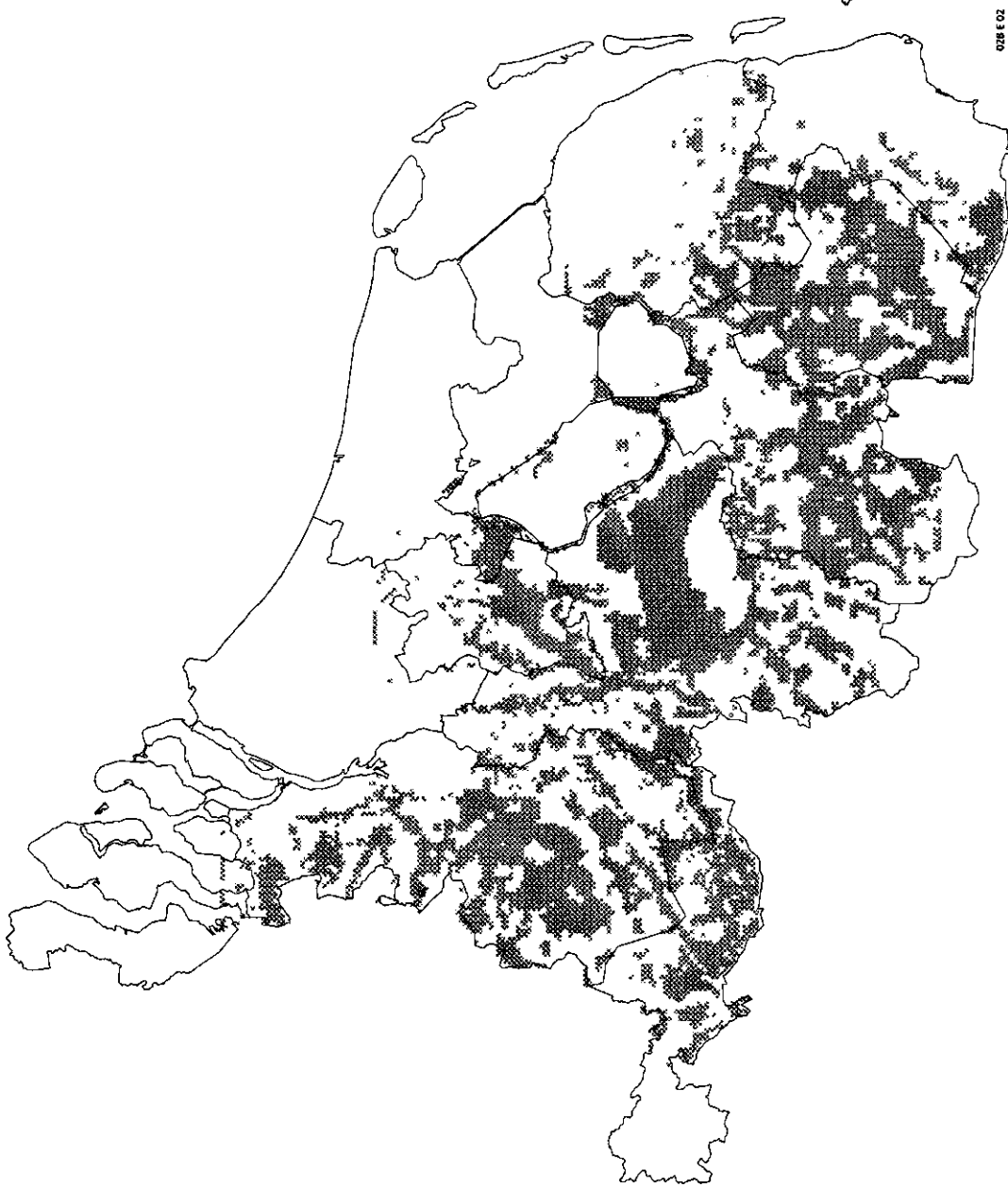


028 E 01

**$c_0$  - waarden in dagen**



**Fig. 1** Waarden van de verticale weerstand,  $C_0$ , van de slechtdoorlatende afdekkende laag (dagen) (naar Pastoors, 1992).



**Fig. 2 Gebieden waar de infiltratie groter is dan  $0,5 \text{ mm.d}^{-1}$ . (afgeleid uit Pastoors, 1992).**

Nederland. In het westelijk deel komt in de droogmakerijen de grondwatertrap IV en hoger voor, terwijl er toch sprake is van kwel, terwijl juist bij de grondwatertrappen I t/m III wegzijging overheerst (Boels, 1983)

**4 De stroomsnelheid en -richting in het watervoerend pakket;**

Een hoge stroomsnelheid in het watervoerend pakket bevordert de verspreiding. De gradiënt in en de doorlatendheid van het pakket bepalen de stroomsnelheid. De stromingsrichting kan neerwaarts zijn (wegzijging), opwaarts (kwel) of hellend ('horizontale' stroming). De stroomsnelheid wordt afgeleid uit de gradiënt van de stijghoogte in het watervoerend pakket en de doorlatendheid van dat pakket. De gradiënt wordt afgeleid uit isohypsen (verschil in stijghoogte, gedeeld door de

afstand langs stroomlijn). ARC-INFO kan dat niet. Een oplossing is om deelgebieden te definiëren en 'met de hand' de gradiënt in het deelgebied te bepalen en in te voeren. Omdat de gradiënten in het algemeen gering zijn, wordt een vereenvoudiging verkregen door de snelheid te koppelen aan de doorlatendheid. In gemiddelde situaties is bij een doorlatendheid van het watervoerend pakket kleiner dan 2,5 m, de stroomsnelheid gering.

Geconcludeerd kan worden dat verspreiding van stoffen in de bodem beperkt zal zijn in gebieden waar kwel optreedt. De kwel en wegzijging kan worden afgeleid uit:

- weerstand afdekkend pakket (C);
- stijghoogte grondwater in eerste watervoerend pakket, ten opzichte van de ontwateringsbasis ( $H_a$ );
- gemiddeld grondwater niveau ten opzichte van de ontwateringsbasis ( $H_o$ );

$$F_v = \frac{H_a - H_o}{C} = \frac{e_1 (H_a + N.C) - H_o}{C} \quad (3)$$

hierin is:

$F_v$  = verticale flux;

(+) = kwel,

(-) = wegzijging

De verspreiding is beperkt in gebieden met afwisselend kwel en wegzijging en een slechtdoorlatende afdekkende laag of waar de stroomsnelheid in het eerste watervoerend pakket beperkt is (enkele meters per jaar).

### 3.3 Signaleringstijd

De verblijftijd in de verzadigde zone kan volgens Ernst (1972) worden benaderd met:

$$T_v = \frac{\beta \cdot D}{N} \ln\left(\frac{L}{2x}\right) \quad (4)$$

hierin is:

$T_v$  = verblijftijd tussen x en drain (j)

$\beta$  = porositeit (~ 0,35) ( $m^3 \cdot m^{-3}$ )

D = dikte watervoerend pakket (~ 0,25.L) (m)

N = effectieve voeding grondwater ( $m \cdot j^{-1}$ )

x = afstand vanuit het midden tussen twee drains (m)

Bij het afpompen wordt een gemiddelde grondwaterstandsverlaging verkregen van d m. Per jaar wordt n keer afgepompt. In dat geval kan vgl.4 worden benaderd met:

$$T_v = \frac{\beta \cdot D}{\epsilon \cdot n \cdot d} \ln\left(\frac{L}{2x}\right) \quad (5)$$



hierin is:

$\epsilon$	= bergingscapaciteit onverzadigde zone	$(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$
$n$	= aantal keren per jaar dat wordt afgepompt	(-)
$d$	= grondwaterstandsverlaging door afpompen	(m)

De verblijftijd tussen stortzool en freatisch oppervlak wordt benaderd met:

$$T_o = \frac{\beta_s \cdot H_s + H_o \cdot (\beta - \epsilon)}{S}$$

hierin is

$T_o$	= verblijftijd in onverzadigde zone	(j)
$H_s$	= dikte minerale afdichtingslaag	(m)
$H_o$	= afstand onderzijde minerale afdichtingslaag tot gem. freatisch niveau	(m)
$S$	= lekkage	$(\text{m} \cdot \text{j}^{-1})$

De bergingscapaciteit van de onverzadigde zone is afhankelijk van het bodemtype. Voor zandgronden ligt deze tussen 0,1 en 0,2, voor leemhoudende gronden tussen 0,05 en 0,1 en voor zavel- en kleigronden tussen 0,02 en 0,05. In de drainagelaag en de minerale afdichtingslaag is de grond met waterverzadigd. De effectieve porositeit van deze lagen is ca. 0,35

Een lek zal minstens met een zekerheid van 80% binnen een bepaalde tijd ontdekt moeten worden. In dat geval kan de signaleringstijd worden afgeleid uit:

$$T_s = \frac{1,61 \cdot \beta \cdot D}{n \cdot d \cdot \epsilon} + \frac{\beta_s \cdot H_s + H_o \cdot (\beta - \epsilon)}{S} \quad (7)$$

hierin is:

$T_s$	= signaleringstijd	(j)
-------	--------------------	-----

Bij een drainafstand van 5 m ( $D \sim 0,25L$ );  $n \cdot d \cdot \epsilon \sim 0,25$  m en  $H_s = 0,5$  m;  $H_o = 0,50$  m en een lek van  $0,3 \text{ m} \cdot \text{j}^{-1}$  is de signaleringstijd op zandgronden 3,2-3,4 jaar, op leemhoudende zandgronden 4,3-4,4 jaar en op kleigronden 4,9-5,0 jaar. De verblijftijden in de verzadigde zone is in dit voorbeeld 2,8 jaar op zandgronden, 3,2 jaar op leemhoudende gronden en 3,6 jaar op de kleigronden. De grootse afstand tussen de aanleghoogte van het geomembraam en de gemiddelde grondwaterstand, op voorwaarde dat een signaleringstijd van 5 jaar niet wordt overschreden, is in dit voorbeeld voor zandgronden 2,4-3,7 m, voor leemhoudende gronden 1,4-1,5 m en voor kleigronden 1,0-1,1 m. Indien de onderafdichtingsconstructie op het maaiveld wordt aangelegd, zijn zandgronden met een grondwatertrap t/m VI geschikt, leemhoudende zanden met een grondwatertrap t/m II en kleigebieden alleen grondwatertrap I. Op leemhoudende zandgronden en kleigronden zijn de grondwatertrappen t/m III ook nog geschikt, als een deel van de bovengrond wordt ontgraven voor de onderafdichtingsconstructie wordt aangelegd. De ontgravingsdiepte kan tot 0,5 m (grondwatertrap III) oplopen. De vrijgekomen grond kan eventueel in de eindafdekking worden gebruikt.

Geconcludeerd kan worden dat in zandgebieden met grondwatertrap t/m VI en in de overige gebieden met een grondwatertrap t/m III aan de eis van een bepaalde signaleringstijd is voldaan.

### 3.4 Zetting

Onder zetting wordt de daling van het oorspronkelijk maaiveld verstaan onder invloed van extra belastingen. Het resultaat is dat de dichtheid van verschillende bodemlagen toeneemt, waarbij tegelijkertijd water wordt uitgedreven. Zettingen worden bepaald door de grootte van de belasting, de opbouw van de ondergrond, de zettingseigenschappen en de grondwaterstand.

Afvalstortplaatsen worden gebruikt om allerlei vuil te storten. Dit varieert van huisvuil tot bouwafval. Het volumegewicht van verschillende soorten afval varieert van 750 tot 1350 kg/m<sup>3</sup> (vgl. dichtgepakt, nat zand ca. 2000 kg/m<sup>3</sup>). De dichtheid wordt sterk bepaald door het gehalte aan afbreekbare stoffen en de verdichting tijdens het storten.

De storthoogte varieert van ca. 15 tot 40 meter. Bij de bodembelasting door het afval, moet ook de last van de bovenafdekking en de onderafdichtingsconstructie worden opgeteld (ca. 3,0 m met een totale (natte) massa van ca. 5800 kg.m<sup>-2</sup>). Bij een storthoogte van 30 m en een volumegewicht van 1000 kg. m<sup>-3</sup>, neemt de bodembelasting door een afvalstort toe met ca. 35.800 kg.m<sup>-2</sup> (~350 kPa).

De zetting kan worden berekend met de formule van Koppejan:

$$\frac{\Delta d}{d} = \left( \frac{1}{c_{p,v}} + \frac{1}{c_{s,v}} \log t \right) \operatorname{Ln} \left( \frac{\sigma_{kg}}{\sigma_1} \right) + \left( \frac{1}{c_{p,n}} + \frac{1}{c_{s,n}} \log t \right) \operatorname{Ln} \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_{kg}} \right) \quad (8)$$

hierin is:

$\Delta d$  = afname laagdikte(m)

$d$  = laagdikte(m)

$c_{p,v}$  = samendrukbaarheidsconstante primaire periode voor grensspanning (-)

$c_{p,n}$  = samendrukbaarheidsconstante primaire periode na grensspanning (-)

$c_{s,v}$  = samendrukbaarheidsconstante seculaire periode voor grensspanning (-)

$c_{s,n}$  = samendrukbaarheidsconstante seculaire periode na grensspanning (-)

$\sigma_1$  = gemiddelde korrelspanning voor belasting (kPa)

$\sigma_2$  = gemiddelde korrelspanning nabelasting (kPa)

$\sigma_{kg}$  = grensspanning (kPa)

Voor de berekening van de zetting wordt de voorkeur gegeven aan de formule van Koppejan omdat de tijd erin is betrokken. Dit is van belang om de kans op verstoring van onderafdichtingsconstructies te kunnen beoordelen. (Ongelijkmatige) zetting kan het functioneren aantasten. De periode waarover het zettingsverloop bepaald wordt kan beperkt blijven tot ca. 30 jaar.

Enkele waarden voor de samendrukkingsconstanten zijn in tabel 4 gegeven.

**Tabel 4 Enkele waarden voor de samendrukkingsconstanten in de formule van Koppejan**

Grondsoort	volumegewicht		$c_{p,v}$	$c_{p,n}$	$c_{s,v}$	$c_{s,n}$	$\sigma_{kg}$
	droog(kg.m <sup>-3</sup> )	nat(kg.m <sup>-3</sup> )	(-)	(-)	(-)	(-)	(kPa)
klei(vast)	910	1550	0,03	0,005	0,07	0,012	28
klei(slap)	650	1400	-	-	0,10	-	-
venige klei	800	1300	0,022	0,0058	0,0835	0,0237	27
veraard veen zwart veen	210	1060	-	-	0,24	-	-
veen	130	1040	0,03	0,005	0,20	0,020	11
mosveen riet veen	90	1030	-	-	0,26	-	-
klei, zandh.	1160	1710	0,0058	0,0009	0,049	0,011	58
zandige klei	1300	1800	-	-	0,05	-	-
kleih.zand	1570	2000	0,0047	0,0011	0,0149	0,0014	85
vergraven teelaarde	1460	1900	-	-	0,011	-	-
zand	1590	2000	-	-	0,006	-	-
zavel	1120	1690	0,025	0,006	0,052	0,0036	55

Zand is weinig samendrukbaar, (ongerijpte) klei en veen daarentegen kunnen aanzienlijk worden samengedrukt. Plaatselijk kunnen deze waarden aanzienlijk variëren (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). Bij de zettingsberekening moet rekening worden gehouden met dat deel van de bodem dat na zetting onder het grondwater niveau zal komen te liggen. De definitieve zetting wordt langs iteratieve weg verkregen.

Na 10 000 dagen (ca. 27 jaar) zal een pakket klei van 5 m op een zandondergrond bij een belasting onder een gemiddelde afvalstort, ca. 1,5 m worden samengedrukt, een pakket van 2,5 m ca. 0,75 m en een pakket van 1 m ca. 0,3 m. Op gronden met zavel in de ondergrond is de samendrukking van een pakket van 5 m ca. 1,0 m, van een pakket van 2,5 m ca 0,5 m en van een pakket van 1,0 m ca. 0,2 m. Op een relatief slap zandpakket is de zetting van een pakket van 5 m 0,1 m. De voorbeelden gelden voor situaties waarin de zettingsconstanten tijdens de zettingsperiode niet veranderen. Hiermee moet echter wel rekening worden gehouden, waardoor de berekening gecompliceerder wordt (De Gloppe, 1973).

Op het moment is een globale zettingskaart, schaal 1 : 600 000 beschikbaar (RGD, STIBOKA). De zettingen zijn gebaseerd op een belasting door 10 m zand. Deze zettingen kaart verschaft slechts globale informatie. Voorgesteld wordt om voorlopig op basis van de geologische kaart gebieden uit te sluiten die behoren tot de volgende formaties:

- I Holoceen:
  - jongere kleien/zanden op veen op oudere kleien/zanden
  - veen op oudere kleien/zanden
  - veen
  
- II Formatie van Sinkgraven:
  - zand, klei en veen in beekdalen
  
- III Formatie van Asten:
  - veen van Eemien ouderdom
  
- IV Formatie van Griendtsveen:
  - veen (hoogveen op pleistocene gebieden)

Het voorkomen van deze formaties is in fig. 3 weergegeven.

Gebieden waar samendrukbare lagen ondiep voorkomen hoeven niet ongeschikt te zijn. Deze lagen kunnen worden ontgraven en vervangen door ander materiaal. Ook kan men een voorbelasting aanbrengen waardoor al een groot deel van de zetting is gerealiseerd voor met de aanleg van een stort wordt begonnen. Deze praktijk kan problematisch zijn, omdat de duur van de voorbelasting vaak ettelijke jaren bedraagt en daarom al in een vroeg stadium besluitvorming over de locatie en inrichting moet hebben plaatsgevonden.

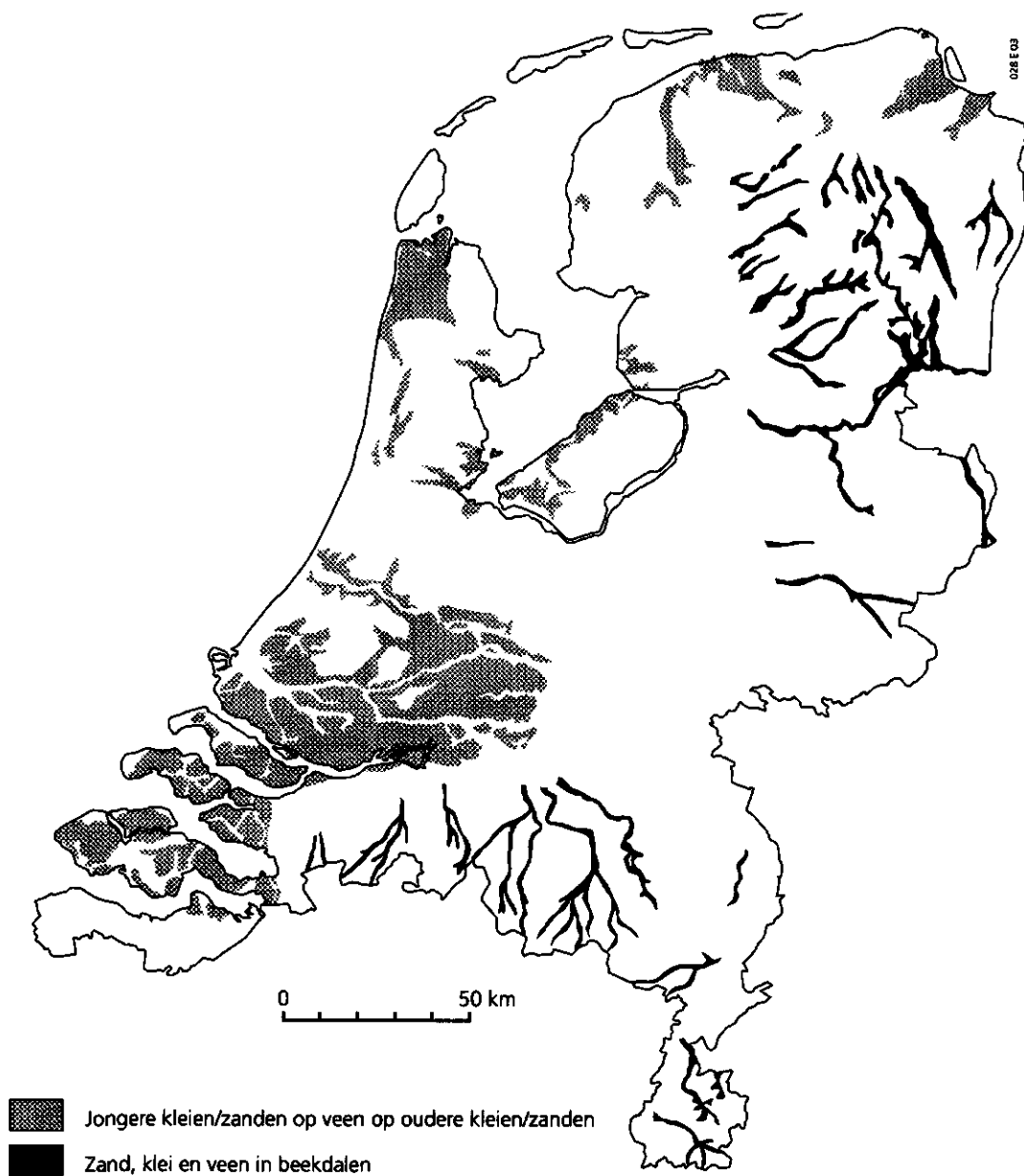
### 3.5 Beheersing

Onder beheersing wordt de mogelijkheid verstaan om bij calamiteiten of lekken, met effectieve, beheersbare en relatief goedkope maatregelen de verspreiding van stoffen in de bodem te kunnen stoppen of op een acceptabel niveau te remmen.

Dit speelt vooral een rol tijdens de storfase, omdat na het sluiten van de stort een bovenafdichting wordt aangebracht, die de isolatiefunctie van de onderafdichtingsconstructie overneemt.

Maatregelen die kunnen worden getroffen zijn:

- hydrologische isolatie;  
Met hydrologisch isolatie wordt het weglekkend percolaat in een pompput opgevangen en gezuiverd. Ook kan ermee bereikt worden dat de stroomrichting wordt afgebogen in de richting van het afvalstort door verlaging van het grondwaterniveau onder en rond de stort;
- civieltechnische isolatie;  
Met een civieltechnische isolatie wordt een constructie bedoelt, die het afvalstort en de daaronderliggende (verontreinigde) bodem van de omgeving isoleert. Damwanden tot in een slechtdoorlatende laag zijn hiervoor mogelijk. Het aanbrengen van (horizontale) dichte lagen is technisch nog niet te realiseren;



**Fig. 3 Zettingsgevoelige gebieden in Nederland (afgeleid uit: De Bakker en Locher, 1990)**

— waterstaatkundige isolatie;

Hiermee wordt bedoeld het manipuleren van peilen in waterlopen waardoor de stroomrichting in de bodem verandert of de stroomsnelheid wordt gereduceerd. Verhoging van peilen op relatief grote afstand van het afvalstort en gelijktijdige verlaging van peilen in open waterlopen rond het afvalstort is hiervan een voorbeeld. In principe behoort dit type maatregel tot de categorie hydrologische isolatie.

Voor de geohydrologische isolatie moet het afdekkend pakket ontbreken of moet de weerstand gering zijn. Het watervoerend pakket moet niet al te dik zijn en de

doorlatendheid niet al te groot. Vermeden moet worden dat veel water moet worden opgepompt en dat het grondwaterniveau in de (verre) omgeving daalt.

Uit Van Ommen (1990), valt af te leiden dat als de verhouding tussen het product van de transversale dispersielengte en de halve gemiddelde doorsnede van het afvalstort en het kwadraat van de dikte van het watervoerend pakket kleiner is dan ca. 0,2 de bodemlagen onder het watervoerend pakket niet verontreinigd zullen worden. Bij een transversale dispersielengte van ca. 0,1 m betekent dit criterium dat de dikte van het watervoerend pakket onder een afvalstort van 100 ha ca. 15 m moet zijn, bij een terrein van 50 ha ca. 13 m en bij een terrein van 25 ha ca. 10 m. Bij een transversale dispersielengte van 0,2 m is dit respectievelijk ca. 25 m, 20 m en 15 m. Lokale omstandigheden en de vorm van het afvalstort bepalen de vereiste dikte van het watervoerend pakket.

Een civieltechnische isolatie slaagt als een verticaal scherm tot aan de een slechtdoorlatende laag kan worden aangebracht. Dieptes groter dan 30-50 m zijn problematisch. Voor deze isolatie moet een slechtdoorlatende laag aanwezig zijn op minder dan 30 m onder maaiveld.

Voor een waterstaatkundige isolatie is een actief peilbeheer in verschillende peilvakken vereist. Deze mogelijkheid wordt aangetroffen in het westelijk deel van Nederland, het zeelei- en rivierengebied.

### **3.6 Selectiecriteria**

Geschikte locaties worden gekozen aan de hand van vijf criteria. Deze zijn in voorgaande paragrafen besproken. De kenmerken van elk criterium is:

#### ***Drooglegging***

Geen eisen, omdat de dikte van de onderafdichtingsconstructie elke locatie toelaat. Alleen gebieden met extreme kwel kunnen beter worden gemedend.

#### ***Verspreiding van stoffen***

Geschikt zijn gebieden met een kwel groter dan  $0,3 \text{ mm.d}^{-1}$ . De kwel-wegzijingssituatie kan uit basis gegevens worden afgeleid, of globaler uit de grondwatertrappenkaart. Voor het oosten van Nederland voldoen de grondwatertrappen I t/m III. In gebieden met een grondwatertrap IV komt zeer waarschijnlijk zowel kwel als wegzijging voor. Bij een zeer gering kwel of zeer gering wegzijging moet bij voorkeur een (Holoceen) afdekkend pakket aanwezig zijn en moet de (Darcy-)stroomsnelheid in het watervoerend pakket bijvoorkeur geringer zijn dan  $2 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ .

### **Signaleringstijd**

De signaleringstijd moet korter zijn dan vijf jaar. Hieraan is voldaan op zandgronden met een grondwatertrap t/m VI en op leemhoudendzanden, klei en zavel met grondwatertrap t/m III.

### **Zetting**

De zetting moet geringer zijn dan 0,25 m. Goede informatie over te verwachten zettingen ontbreekt: de geologische kaarten zijn landelijk nog incompleet en de beschreven dikte van het afdekkend pakket soms onvoldoende. Uit proefberekeningen is gebleken, dat in eerste instantie gebieden moeten worden uitgesloten waar de volgende geologische formaties worden aangetroffen:

#### **I Holoceen:**

- jongere kleien/zanden op veen op oudere kleien/zanden
- veen op oudere kleien/zanden
- veen

#### **II Formatie van Sinkgraven:**

- zand, klei en veen in beekdalen

#### **III Formatie van Asten:**

- veen van Eemien ouderdom

#### **IV Formatie van Griendtsveen:**

- veen (hoogveen op pleistocene gebieden)

### **Beheersing**

Bij voorkeur in kwel-gebieden. Voor een effectieve hydrologische isolatie moet de dikte van het watervoerend pakket afhankelijk van de hydrodynamische dispersie en de vorm en afmeting van het afvalstort, 10-30 m zijn. Voor een civieltechnische isolatie moet bij voorkeur een slechtdoorlatende scheidende laag worden aangetroffen op minder dan 30 m.

## 4 GIS-Uitwerking

### 4.1 Basisinformatie

Relevante basisgegevens zijn:

- grondwatertrappen, voor de bepaling van de diepte van de GLG, de dikte van de onverzadigde zone en het voorkomen van kwel;
- doorlatendheid, voor de bepaling van de stroomsnelheid in het eerste watervoerend pakket;
- isohypsen van het eerste en tweede watervoerende pakket, voor de bepaling van de stroomsnelheid en de interactie tussen het eerste en tweede watervoerende pakket;
- dikte van het eerste watervoerende pakket;
- c-waarden van de scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket;
- geologische gegevens, voor de bepaling van de kans op zetting;
- topologische gegevens, voor de bepaling van de ligging van drainerende elementen.

Met behulp van deze gegevens is het locatiekeuzep proces doorlopen.

Voor het uitwerken van het proces in een GIS-omgeving, moeten de ruimtelijk verdeelde gegevens in digitale vorm beschikbaar zijn.

### 4.2 Basiskaarten

Een geografisch informatie systeem is een systeem waarmee ruimtelijke, dus geografisch gebonden informatie ingevoerd, opgeslagen, bewerkt en geanalyseerd kan worden. Als te gebruiken systeem is gekozen voor ARC-INFO, aangezien het een algemeen gebruikt pakket is en gedigitaliseerde bestanden beschikbaar zijn.

Als proefgebied is een gedeelte van de Centrale Slenk (Brabant) gekozen omdat hiervoor een groot aantal gegevens beschikbaar is. Het studiegebied is van beperkte omvang omdat de noodzakelijke geologisch informatie beperkt is; tot nu toe zijn voor slechts een beperkt deel van Nederland geologische kaarten uitgebracht. In Brabant betreft dit het gebied in de omgeving van Eindhoven (kaartbladen 51-west, 51-oost en 52-west). De beschikbare hydrogeologische gegevens beschrijven het gebied ten westen van Eindhoven en gedeeltelijk het gebied van kaartblad 51-west. De oppervlakte van het onderzoeksgebied bedraagt 75 km<sup>2</sup>. De (wereld)coördinaten van de vier hoeken zijn:

X:	140,000	140,000	145,000	145,000
Y:	385,000	400,000	385,000	400,000

Voor de isohypsen (lijnen van gelijke stijghoogte in het watervoerend pakket) in het eerste en tweede watervoerend pakket is gebruik gemaakt van de Bodemkaart van Nederland (kaartblad 51-west), de Topologische kaart (kaartblad 51-west) en van het



Centrale Slenk model van IWACO. Aan dit model zijn verder nog ontleend:

- k-waarden van het eerste watervoerende pakket;
- dikte eerste watervoerend pakket;
- c waarden van de scheidende laag.

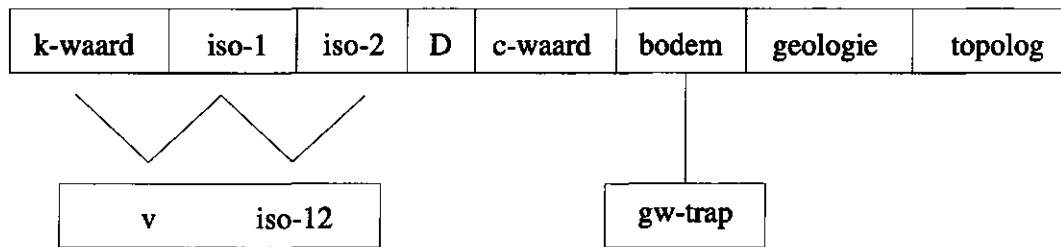
De gegevens zijn vervolgens gecodeerd:

k-waard	iso-1	iso-2	D	c-waard	bodem	geologie	topolog
---------	-------	-------	---	---------	-------	----------	---------

Voor de toepassing van het keuzemodel zijn acht basis kaarten samengesteld met behulp van ARC-INFO:

- k-waarden;  
In het aangeleverde digitale bestand was het gebied opgedeeld in een aantal k-waarde klassen ( $k = 5$  m/d en  $k = 50$  m/d). Het studie gebied valt geheel in een gebied met een doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket van 5 m/d (aanhangel 1).
- Isohypsens eerste watervoerend pakket;  
Deze gegevens zijn zelf gedigitaliseerd. De intervallen tussen opeenvolgende isohypsen is 1 meter (aanhangel 2).
- Isohypsens tweede watervoerend pakket;  
Idem (aanhangel 3).
- Dikte eerste watervoerend pakket;  
De dikte van het eerste watervoerend pakket is onderverdeeld in klassen. Ten behoeve van deze studie is daarin een verdere onderverdeling gemaakt (aanhangel 4):  
klasse 30 < 30 m  
klasse 50 30-50 m  
klasse 80 50-100 m  
klasse 100 > 100 m
- c-waard(en);  
Deze gegevens waren aangeleverd als puntgegevens. Nadat het bestand in de goede vorm was ingelezen, is het puntenbestand omgezet in een isolijnenbestand. Er zijn isolijnen getrokken met intervallen van 150 dagen (aanhangel 5).
- Bodemkaart;  
Op deze kaart staat, naast de bodemkundige gegevens, ook de grondwatertrappen-indeling van het gebied.
- Geologische kaart;  
Deze kaart is zelf gedigitaliseerd op basis van het zettings-criterium (aanhangel 6).
- Topologische kaart;  
Ook deze kaart is zelf gedigitaliseerd. Naast de ligging van de waterlopen zijn ter oriëntatie ook de wegen en dorpen in het gebied weergegeven (aanhangel 7).

Voordat aan de vervaardiging van geschiktheidskaarten per criterium is begonnen, zijn eerst een aantal afgeleide kaarten gemaakt. De kaart met k-waarden en de isohypsenkaart zijn gecombineerd tot een kaart met de stroomsnelheden. De isohypsenkaarten van het eerste en tweede watervoerende pakket zijn samengevoegd om gebieden te localiseren waar water vanuit het eerste watervoerend pakket naar het tweede pakket stroomt. Ten slotte is uit de bodemkaart een grondwatertrappen-kaart afgeleid.



— **Stroomsnelheden;**

De gemiddelde stijghoogtegradiënt tussen de opeenvolgende isohypsen is berekend en vermenigvuldigd met de doorlatendheid (k). Uit deze berekening volgt de stroomsnelheid (v). De stroomsnelheid is overal kleiner dan  $1,5 \text{ m.d}^{-1}$  (aanhangsel 8).

— **Gecombineerde isohypsenkaart;**

Als de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket groter is dan de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, is de kans klein(er) dat er verontreinigingen vanuit pakket 1 naar pakket 2 zullen stromen. Door op de gecombineerde isohypsenkaart te zoeken naar de plaatsen waar de isohyps van pakket 2 lager (dat betekent verder naar het zuiden, aangezien de stroming noordwaarts is) ligt dan dezelfde isohyps van pakket 1, kunnen de plaatsen bepaald worden waar op grond van dit kenmerk de kans bestaat op uitwisseling van verontreiniging naar het tweede watervoerend pakket (aanhangsel 9).

— **Grondwatertrappenkaart;**

Deze kaart werkt nog via de 'oude indeling' (zie tabel 3 en aanhangsel 10).

— **Kwelkaart;**

Voor het maken van deze kaart is er van uitgegaan, dat mag worden aangenomen dat in het oosten van Nederland kwel voorkomt in gebieden met een grondwatertrap I t/m III (aanhangsel 11).

— **Diepe grondwaterstand;**

De gemiddeld laagste grondwaterstand in de grondwatertrappen V en VI is meer dan 1,20 m onder maaiveld. Aangenomen mag worden aangenomen dat in deze gebieden de diepste grondwaterstanden tot enkele meters beperkt blijft. Dit geldt niet voor gebieden met een grondwatertrap VII en VII\* (zie aanhangsel 12).

De grondwatertrappenkaart is verder omgezet naar een kwel- en wegzijgingskaart en verder naar een kaart met potentiële diepe grondwaterstanden (grondwatertrap VII of VII\* (GLG > 1,60 m)). Aan de hand van peilbuisgegevens kan de werkelijke grondwaterstand in deze gebieden bepaald worden.

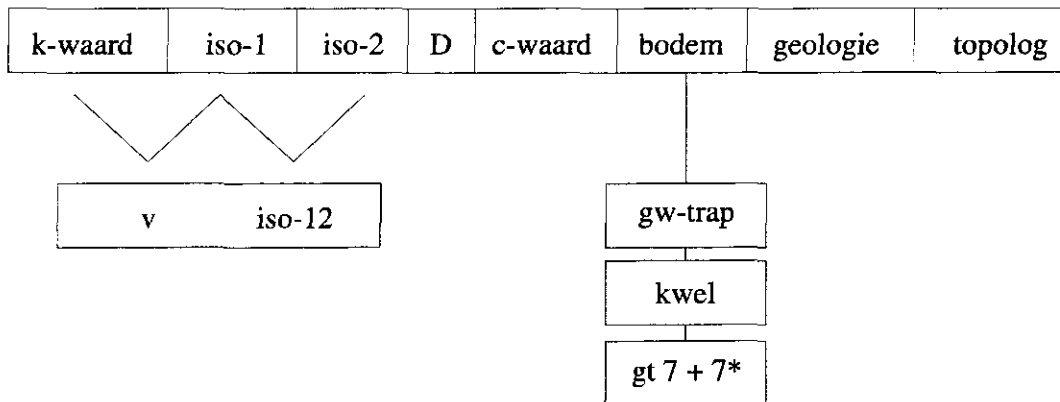
De gebruikte ARC-INFO commando's en procedures zijn:

— **CLIP;**

Gebruikt voor het 'uitsnijden' van het gebruikte gebied uit grotere kaarten. De 'clip-coverage' bevat alleen de buitengrenzen van het gebied.

— **DISSOLVE;**

Een commando voor het indelen van gebieden op grond van klassen (zoals de kaart met dikten van het eerste watervoerende pakket). Daarvoor wordt in het 'INFO'-deel van het pakket de kengetallen van gebiedsdelen opnieuw gewaardeerd. In het geval van de dikte-coverage zijn de laagdikten omgezet naar de waarden 30, 50, 80 of 100. Ook voor het samenvoegen van afzonderlijke gebieden met een zelfde waarde



die een gemeenschappelijke grens hebben, wordt dit commando gebruikt.

— TIN, TINCONTOUR;

Voor het maken van isolijnen op basis van een 'puntencoverage'.

— UNION;

Voor het combineren van twee of meer coverages. Daartoe wordt in de 'INFO'-tabel een nieuw item gedefinieerd met het commando DEFINE. Het nieuwe item is een combinatie van waarden van de oude coverages. Het nieuwe item moet met de hand worden ingevoerd omdat ARC-INFO niet zelfstandig waarden kan combineren.

— Digitaliseren van kaarten en gegevens;

Het digitaliseren van de geologische en topologische kaart, blad 51 west, is gebeurd met een Calcomp 9100 digitizer in combinatie met een tektronix 4208 grafische terminal. Het invoeren van de gegevens is gebeurd via het commando ADS.

— CLEAN;

De topologie van de gedigitaliseerde geologische en topologische kaart is ingevoerd met het commando CLEAN, voor een 'fuzzy tolerance' 0,1 en 'dangling length' 30.

— SHADEEDIT en LINEEDIT;

Voor het invoeren van verschillende symbolen; gebruikt voor de topologische kaart.

### 4.3 Criteriumkaarten

#### 4.3.1 Grondwaterstand.

Het criterium 'grondwaterstand' is op basis van de grondwatertrappen-tabel ingevoerd. Gebieden met een grondwatertrappen VII en VII\* zijn uitgesloten (fig. 5).

#### 4.3.2 Verspreiding.

Een aantal kaarten zijn nodig voor het opstellen van het verspreidingscriterium. Deze betreffen (tussen haakjes de kaartnaam-code volgens de schema's in paragraaf 4.2):

— Doorlatendheid (k-waard);

Voorlopig is de de doorlatendheid van de onverzadigde zone gelijk gesteld aan die van de verzadigde zone. Bij verdere uitwerking kan op basis van de bodemkaart en de daaraan gekoppelde informatie een schatting van de gemiddelde doorlatendheid in de onverzadigde zone worden gemaakt.

- Grondwatertrappenkaart;  
Hieruit is de dikte van de onverzadigde zone afgeleid voor de trappen VII en VII\* (gt 7 en 7\*).
- Kaart met stroomsnelheden (v);
- Kaart met de uitwisseling tussen het eerste en tweede watervoerende pakket (iso-12);
- Kaart met de dikten van het eerste watervoerende pakket (D);  
Kwelkaart (kwel);
- Topologische kaart (topolog);  
Gebruikt voor de beoordeling van de ligging van drainerende elementen (kunstmatige onttekkingsen en gevoelige gebieden zijn niet in het proefgebied aanwezig).

Door deze kaarten te combineren (commando UNION) en enige aanpassingen in de 'INFO'-tabel werd fig. 5 verkregen. Hierop zijn alleen de gebieden aangegeven die aan het verspreidingscriterium voldoen. Strikt genomen moet van de grondwatertrappen VII en VII\* de GLG bepaald worden. In het voorbeeld hoeft dit niet omdat gebieden die op grond van andere criteria geschikt zijn niet samenvallen met het gebied van deze grondwatertrap. Gebieden die in de nabijheid van waterlopen liggen, genieten de voorkeur omdat daar de verspreiding in de bodem zeker beperkt zal blijven.

#### 4.3.3 Signalering.

Als criterium voor de signalering van lekken geldt een korte signaleringstijd en de mogelijkheid om een horizontaal drainstelsel aan te leggen. De volgende kaarten zijn daarvoor nodig (volgens paragraaf 4.2 kaartcode tussen haakjes):

- Grondwatertrappenkaart (gwtrap);  
Gebieden met grondwatertrap VII en VII\* voldoen niet omdat de (verwachte) diepste grondwaterstand te groot is.
- De kaart met de dikte van de verzadigde zone (D);
- De topologische kaart (topolog);  
Voor de bepaling van de ligging van de drainerende elementen.

Combinatie van deze kaarten levert gebieden die volgens het verspreidingscriterium geschikt zijn (fig. 5). Voor de precieze bepaling van de gemiddeld laagste grondwaterstand in de deelgebieden met een grondwatertrap VII en VII\* is aanvullend onderzoek nodig (archief IGG-TNO).

#### 4.3.4 Zetting

Voor het vervaardigen van de geschiktheidskaart op basis van het zettingscriterium is de geologische kaart van Nederland, blad 51, Eindhoven West, gebruikt. Omdat informatie over zettingsconstanten en precieze laagopbouw ontbreekt, is de verwachte zetting in drie klassen ingedeeld: klein, matig of groot. Geen onderscheid kon worden gemaakt naar gelijkmatige en ongelijkmatige zetting. Gebieden waar de verwachte zetting klein is, zijn zeker geschikt.

De gebiedswaardering in fig. 7 is gebaseerd op de legenda van kaartblad 51-west: Holocene:

Formatie van Singraven;

Si<sub>v</sub> : Veekafzettingen (eutroof, plaatselijk met leemlagen) dikker dan 1 m

Si<sub>b1</sub> : Beekafzettingen 1 (fijn en matig grof zand) dikker dan 1 m

Si<sub>b2</sub> : Beekafzettingen 2 (leem, meestal humeus, plaatselijk venig) dikker dan 1 m

Pleistoceen:

Nuenengroep;

Eolische periglaciaire afzettingen;

Nu3: Dekzand (fijn zand en lemig fijn zand) dikker dan 2 m

Nu1: Löss & dekzand (fijnzandige leem en lemig fijn zand) dikker dan 2 m

Fluvio-/eolische periglaciaire afzettingen;

Nu4<sub>1</sub>: Fluvioperiglaciaire afzettingen 1 (matig fijn tot zeer grof zand, deels met planten- en houtresten)

Nu4<sub>2</sub>: Fluvioperiglaciaire afzettingen 2 (matig fijn tot zeer grof zand en leem, gelaagd; deels met planten- en houtresten)

Lacustro-eolische periglaciaire afzettingen;

Nu2: Brabants leem (leem, plaatselijk humeus of venig)

Formatie van Sterksel;

St: Rivierafzettingen (matig fijn en grindhoudend grof zand, plaatselijk met kleilagen)

Ook zijn nog verschillende soorten bedekkingen onderscheiden die alle dunner zijn dan 2 meter. Als deze lagen zettingsgevoelig zijn, wordt verwacht dat deze in voorkomende gevallen worden ontgraven en zijn daarom niet in de beoordeling betrokken. Op basis van deze legenda is de klasse indeling voor zettingen gemaakt:

**Tabel 5 Klasse-indeling verwachte zettingen**

Zetting	Formaties
klein	Nu3, Nu1, Nu4 <sub>1</sub> , Nu4 <sub>2</sub> , St
matig	Si <sub>b1</sub>
groot	Si <sub>v</sub> , Si <sub>b2</sub> , Nu2

Als veen in het profiel voorkomt zal de zetting groot zijn. Matige zettingen worden verwacht in de beekafzettingen en geringe zettingen in pleistocene afzettingen.

De informatie omtrent de zettingsverwachting is beperkt; de geologische kaart is afgeleid uit ca. 10 handboringen per km<sup>2</sup> tot ongeveer 4 meter. Omdat stortterreinen een grote grote belasting op de bodem uitoefenen, moeten ook bodemlagen op grotere diepte worden beoordeeld. De omvang van geschikte gebieden kan daardoor alleen nog maar afnemen.

Omdat voldoende gegevens ontbreken kan de zetting niet worden gekwantificeerd. Voor de provincies Friesland en Gelderland heeft de RGD zettingskaarten samengesteld met een gridcelgrootte van 1000 m resp 500 m op basis van relatief veel gegevens.

#### 4.3.5 Beheersbaarheid

De samenstelling van de geschiktheid op basis van beheersbaarheid vraagt de volgende kaarten (naam volgens paragraaf 4.2 tussen haakjes):

- k-waarden kaart (k-waard);  
Voor de beoordeling van verspreiding van stoffen in de bodem;
- Grondwatertrappen kaart (gt 7 + 7\*);  
Voor de bepaling van gebieden met een waarschijnlijk grote verblijftijd van de verontreiniging in de onverzadigde zone;
- De kaart met de dikten van het eerste watervoerende pakket (D).  
Voor de beoordeling van mogelijkheden voor hydrologische isolatie;
- De stroomsnelhedenkaart (v);
- De kaart met c-waarden (en diepte) van de scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket (c-waard).

Fig. 8 laat het resultaat van de combinatie van deze kaarten zien. Voor de 'gt 7 en 7\*' gebieden die binnen potentiëel geschikt gebied vallen, moet de GLG nog worden bepaald aan de hand van grondwaterstands metingen (IGG-TNO).

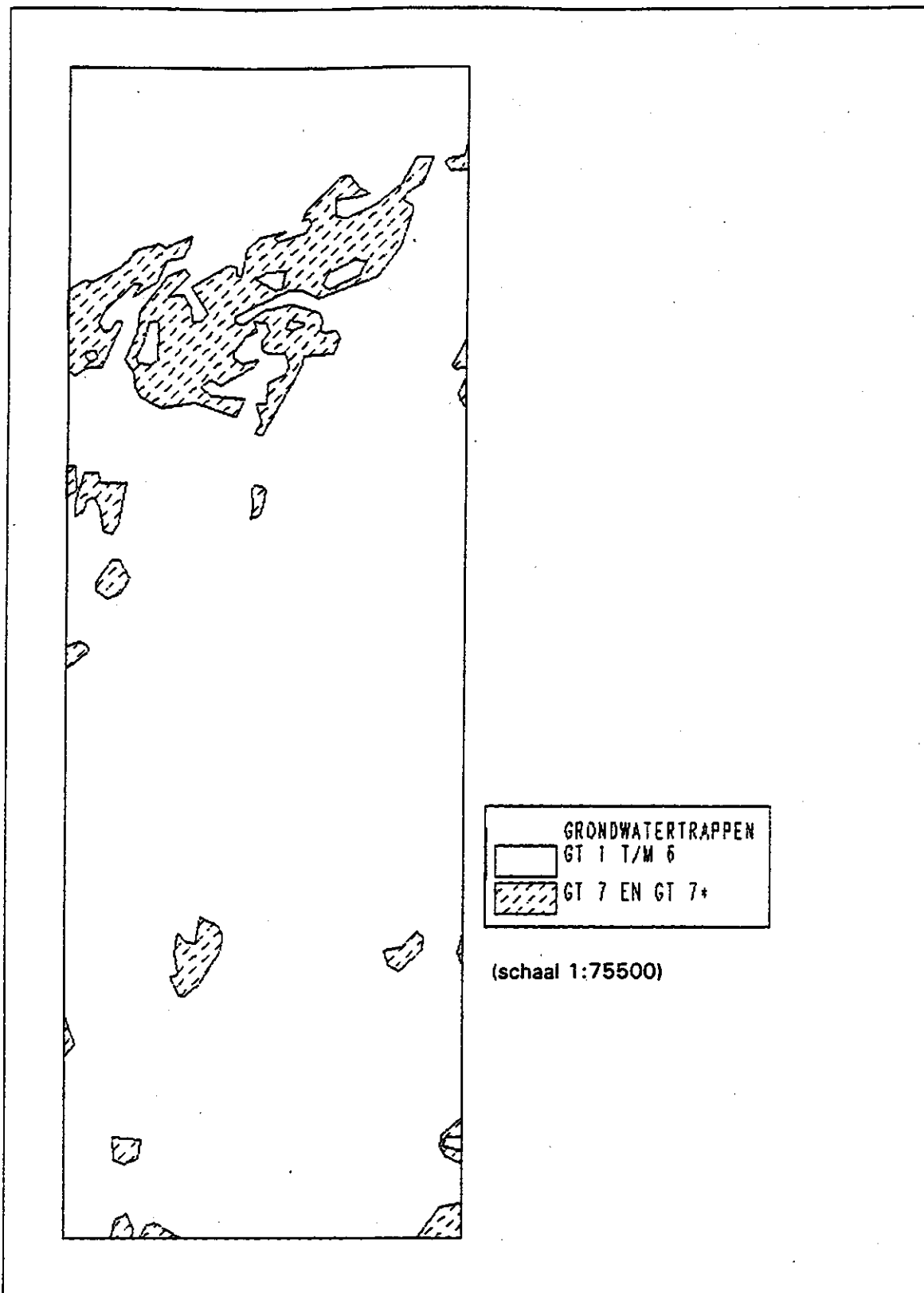
De iso-lijn van de C-waarden in fig. 8 hebben geen absolute betekenis. Gebieden met een c-waarde > 150 d, hebben de voorkeur, maar komen hier niet voor.

#### 4.4 Eindwaarderingskaart

De eindwaarderingskaart wordt verkregen door combinatie van de deelgeschiktheidskaarten voor gemiddeld hoogste grondwaterstand, verspreiding, signaleringstijd, zetting en beheersbaarheid. Dit is gebeurt in 'ARC-PLOT', waardoor geschikte gebieden volgens individuele criteria ook zichtbaar blijven. De reden waarom een bepaald gebied niet geschikt is kan direct van de kaart worden afgelezen. Dit kan handig zijn als ook ander factoren in het keuzeproces worden betrokken. Fig. 9 geeft de eindwaarderingskaart weer. Een tekortkoming is de gelijke weergave van de gebieden die geschikt zijn bevonden op grond van het criterium verspreiding en de gebieden die een matige kans op zetting hebben. Voor de duidelijkheid wordt vermeld, dat het links gelegen, langgerekte zwarte gebied gewaardeerd is op grond van het criterium zetting.

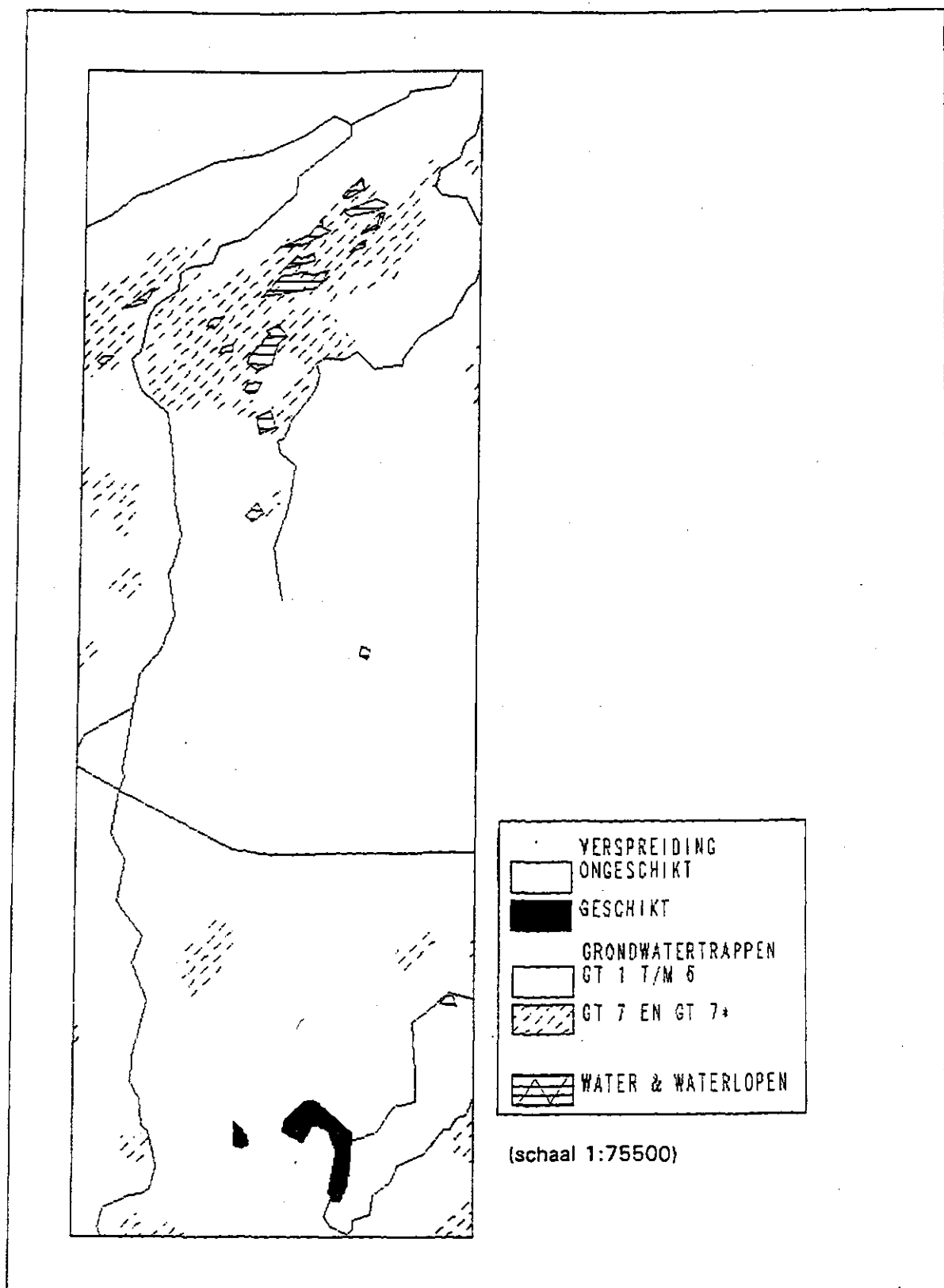
Uit fig. 9 valt af te leiden dat het meest geschikt gebied ook al op grond van het verspreidingscriterium werd gevonden. Een ander gebied dat op basis van het verspreidingscriterium geschikt was, valt in een gebied waar de verwachte zetting groot is en daarom niet geschikt.

Omdat er geen gradatie in de mate van geschiktheid is aangebracht, is een gebied alleen maar geschikt of ongeschikt.

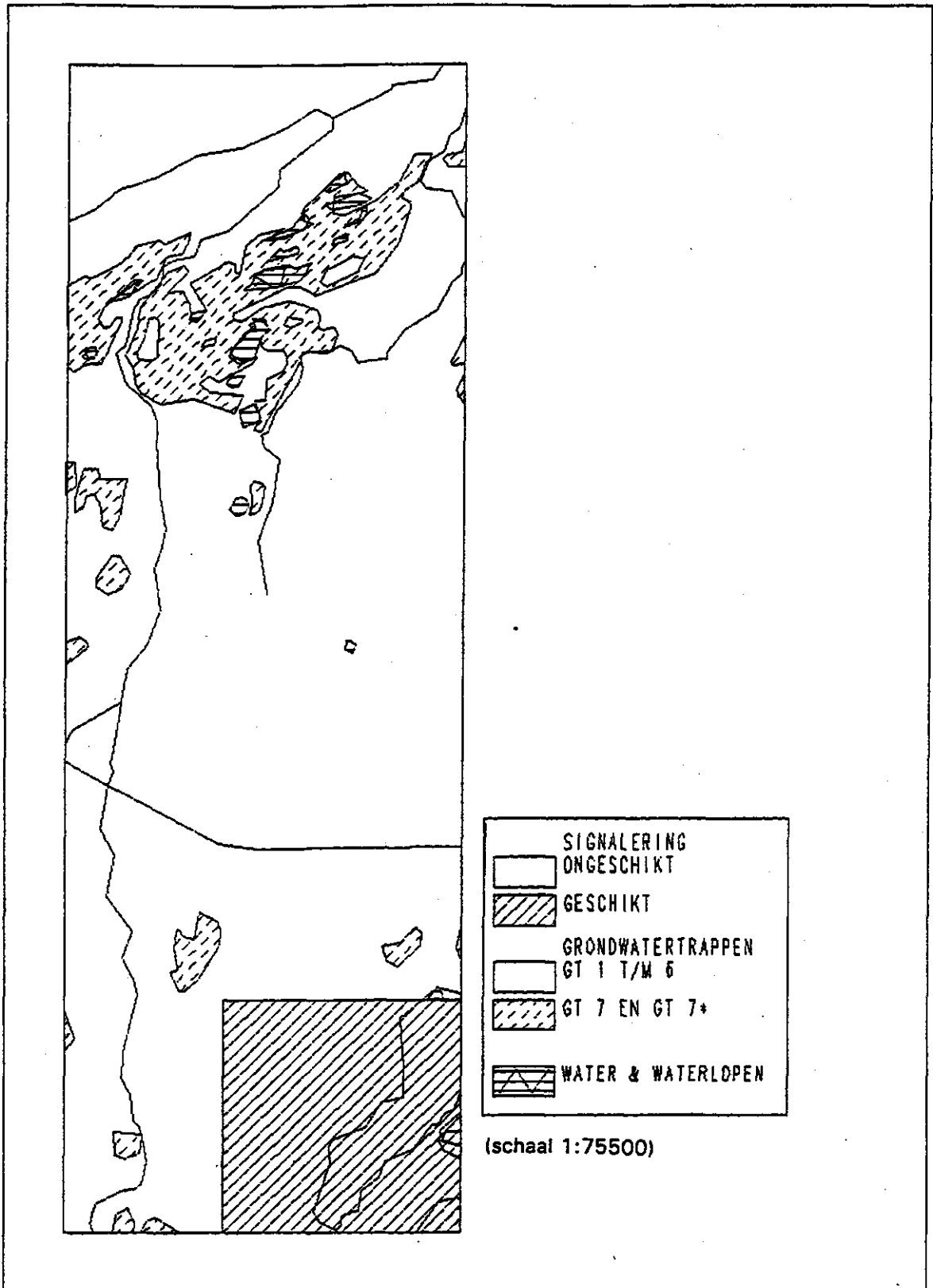


**Fig. 4 GIS-uitwerking van het grondwaterstandscriterium**

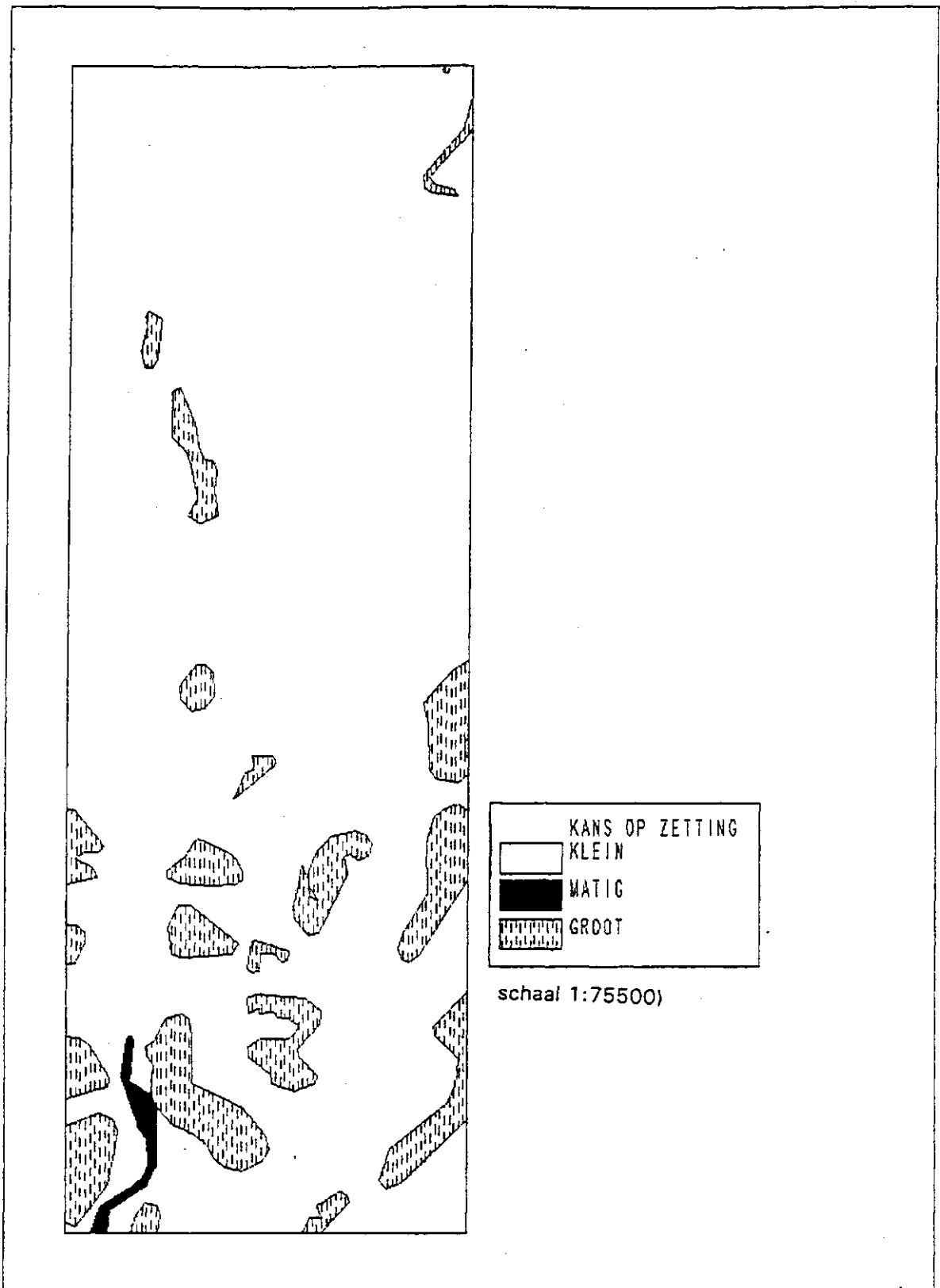




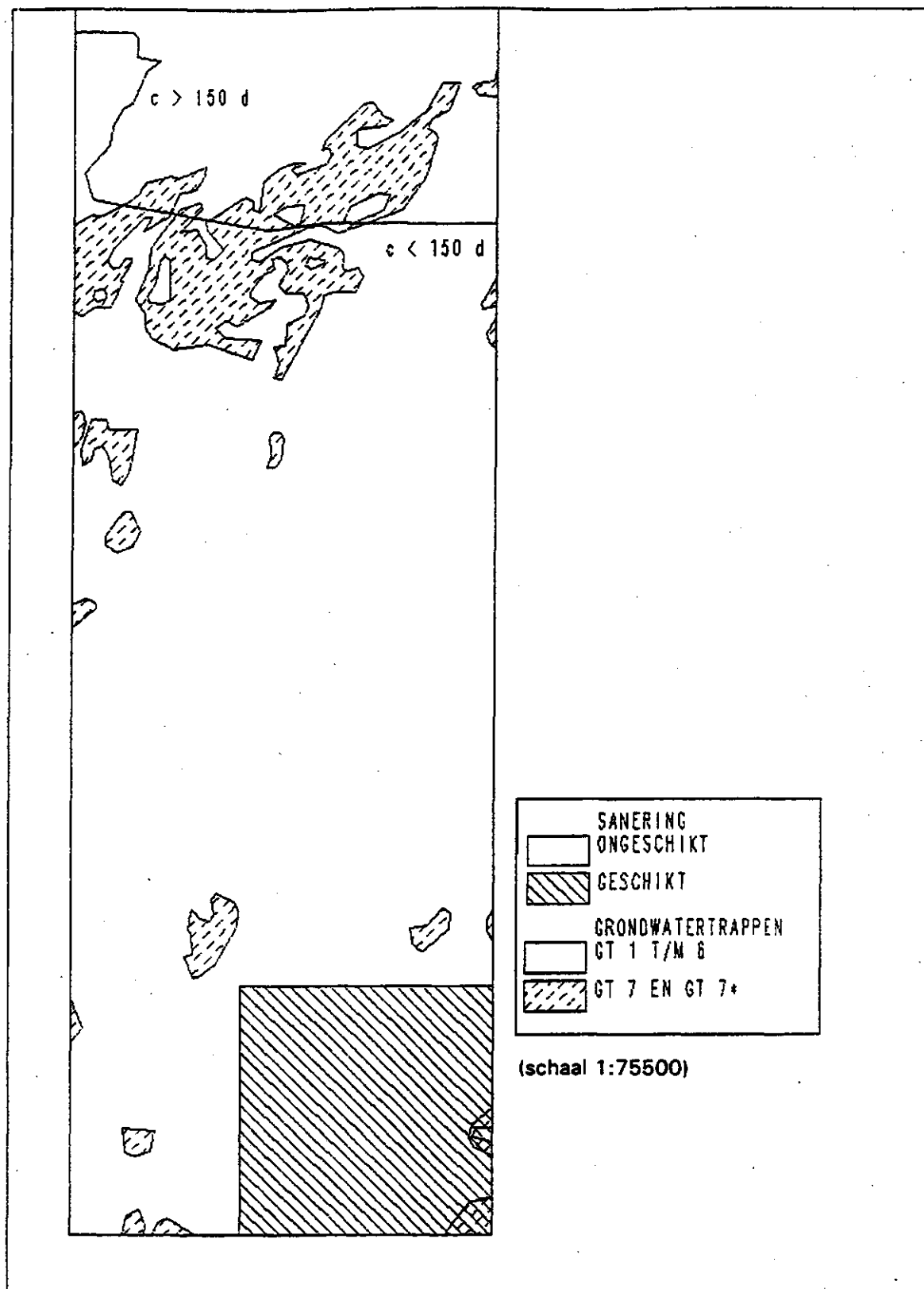
*Fig. 5 GIS-uitwerking van verspreidingscriterium*



**Fig. 6 GIS-uitwerking van signaleringscriterium**



**Fig. 7 GIS-uitwerking van zettingscriterium**



**Fig. 8 GIS-uitwerking geschiktheid voor hydrologische isolatie ('sanering')**

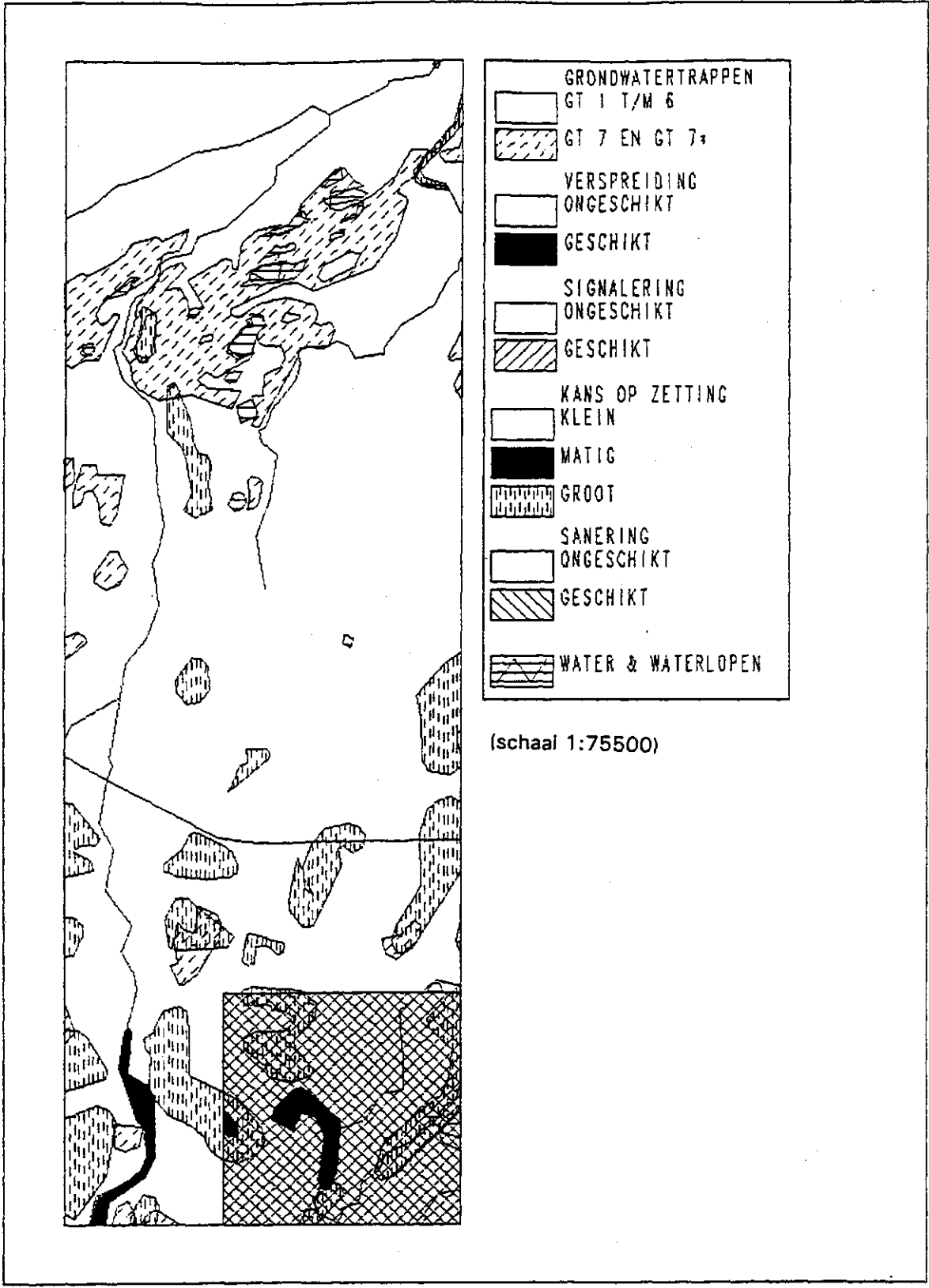


Fig. 9 Eindwaarderingskaart

## 5 Conclusie en aanbevelingen

De ontwikkelde methode voor de locatiekeuze van afval- en reststofbergingen is gebaseerd op deels kwalitatieve en deels kwantitatieve eisen die de nieuwe regelgeving aan de stortlocatie stelt. Ruimtelijke geologische, geohydrologische, hydrologische en bodemkundige kenmerken zijn gerelateerd aan eenvoudige, beschikbare bodemkundige en geohydrologische informatie. De eisen die aan een locatie worden gesteld zijn:

- gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) 0,7 m beneden stortzool;
- signaleringstijd lekken minder dan 5 jaar;
- kwel minstens 0,1 mm per dag maar minder dan 1 mm per dag;
- zetting hooguit 0,25 m;
- dikte eerste watervoerend pakket 10-20 m;
- slecht-doorlatende laag op minder dan 30 m onder maaiveld.

De eisen met betrekking tot de GHG, signaleringstijd en kwel zijn gerelateerd aan grondwatertrappen. Bij de huidige onderafdichtingsconstructies met een dikte van een minerale laag (drainlaag en minerale afdichting) van 0,8 m, geldt geen beperking ten aanzien van de vereiste grondwatertrap. Voor de zettingseis bestaan geen kwantitatieve gegevens en is voorlopig volstaan met een kwalitatieve indeling van verschillende geologische formaties. Zettingen kunnen worden verwacht in Holocene afzettingen, Formaties Sinkgraven, Asten en Griendtsveen en zijn daarom minder of niet geschikt. Om de kans op verspreiding van stoffen in de bodem te voorkomen, gelden locaties als gunstig als daar kwel voorkomt, een slecht-doorlatend Holoceen pakket of een relatief dun watervoerend pakket (< 10 m) met een geringe hydraulische gradiënt of geringe doorlatendheid. Verspreiding van stoffen bij grote lekken kan worden beperkt als hydrologische isolatie mogelijk is of als een verticaal scherm tot in een slecht-doorlatende laag kan worden aangebracht. Om weglekkende verontreiniging volledig te kunnen opvangen in pompputten moet het pompfilter op een zekere diepte zijn aangebracht. Afhankelijk van de afmeting van de stort, bedraagt deze diepte 10-20 m onder maaiveld. Het watervoerend pakket moet dan ook deze dikte hebben. Verticale schermen kunnen tot een diepte van ca. 30 m worden aangebracht. Binnen die diepte moet dan ook een slecht-doorlatende laag aanwezig zijn.

Met behulp van het ARC-INFO-pakket is de methode toegepast op een proefgebied. Daarbij is gebruik gemaakt van gedigitaliseerde informatie over:

- bodem en grondwatertrappen;
- doorlatendheid eerste aquifer;
- gemiddelde grondwaterstand;
- stijghoogteverdeling in de eerste en tweede aquifer;
- dikte van het eerste watervoerend pakket;
- hydraulische weerstand eerste scheidende laag;
- geologie (zettingsgevoelige lagen en zettingsconstanten);
- topologie.

De grondwatertrappenindeling verschaft geen inzicht in de gemiddeld laagste grondwaterstand voor grondwatertrappen VII en VII\* en geeft slechts een globale indicatie van kwel en wegzijging. Beter is om voor de kwel- en wegzijging informatie te gebruiken die voor het opstellen van provinciale waterhuishoudings- of water-beheersplannen is verzameld. Het is aan te bevelen om deze informatie centraal en in gedigitaliseerde vorm op te slaan. De gemiddelde grondwaterstand kan worden ontleend aan de TNO-bestanden. Aanvullend zou ook landsdekkend informatie moeten worden verzameld over polderpeilen (of streefpeilen in grote waterlopen), ontwateringsdieptes en drainage-weerstanden.

De geologische kaart is nog niet voor geheel Nederland vervaardigd en verschaft met betrekking tot zettingsconstanten geen informatie. De beschrijving van de bovenste lagen (tot ca. 10 m) is niet overal toereikend.

Informatie over stijghoogteverdeling in de verschillende watervoerende pakketten en de opbouw van de bodem is beperkt aanwezig.

De uitwerking van het model met behulp van het Geografisch Informatie Systeem ARC-INFO is goed mogelijk. Dit pakket werkt uitsluitend met kenmerken (attributen) van kaartvlakken. Door de beperkte rekenmogelijkheden van dit pakket moet nog veel handwerk worden verricht om lijninformatie (bijvoorbeeld isohypsen) te transponeren naar vlakinformatie. Met de nieuwe versie 6.1 van ARC-INFO kan de optie voor een vaste gridindeling worden gebruikt, waardoor deze omzetting eenvoudiger wordt. De gebruikers-vriendelijkheid van dit pakket is nog niet erg groot en vereist specialistische kennis.

Het digitaliseren van kaarten en het invoeren van gebiedskenmerken is tijdrovend.

De ontwikkelde methode leent zich voor toepassing op regionale (provinciale) schaal. Als nog veel informatie gedigitaliseerd moet worden, is het aan te bevelen om in eerste instantie zoveel mogelijk gebied uit te sluiten op grond van andere criteria (bebouwing, infrastructuur, gebieden van grote natuurlijke of historische waarde etc.).

Voor toekomstige toepassing is het aan te bevelen om gebieds-kenmerken in klassen in te delen vanaf niet-geschikt tot geschikt en de geschiktheidsklassen te combineren met pakketten van maatregelen en voorzieningen waarmee de bodembescherming kan worden gebracht op het niveau op de referentie-locatie volgens de nieuwe regelgeving. Worden ook nog de benodigde investering en kosten van de aanvullende maatregelen en voorzieningen ingevoerd, dan kan voor elke niet-optimale locatie de extra kosten in beeld worden gebracht.

## Literatuur

- Adriaanse, A., 1991. *Milieukerngegevens Nederland*. Den Haag, Ministerie van VROM.
- Bakker, H. de en W.P.Locher, 1990. *Bodemkunde van Nederland. Deel 2, Bodemgeografie*. 's-Hertogenbosch, Malmberg.
- Boekelman, R.H., 1985. 'Tijdelijke opslagplaatsen voor verontreinigde grond (3), Enige overwegingen ten aanzien van de onderafdichting'. *Milieutechniek Nr. 4*.
- Boels, D., 1993. *Studie naar onderafdichtingsconstructies voor afval- en reststofbergingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 247.
- Boels, D. and G. Flemming, 1993. *Chemical Timebombs from landfills: appraisal and modelling*. *Land Degradation & Rehabilitation*, 4: 399-405.
- Boels, D., A.G. Hengeveld, M.M. Nass en P. Groenendijk, 1993. *Verspreiding van stoffen uit afvalstortterreinen in relatie tot de kwaliteit van afdichtingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 246.
- Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford Univ. Press, 2<sup>e</sup> ed.
- Centraal Bureau voor Statistiek (CBS), 1990. *Algemene milieustatistiek, 1989*. Den Haag, SDU-uitgeverij.
- Glopper, R.J. de, 1973. 'Subsidence after drainage of the deposits in the former Zuiderzee and in brackish and marine forelands in the Netherlands'. Lelystad, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, *Van Zee tot Land nr. 50*.
- Gijsberts, C.P., 1992. *Een steuntje bij het storten. Een beslissingsondersteunend model als hulpmiddel bij de locatiekeuze van een afvalstortplaats*. Utrecht, Afval Overleg Orgaan (AOO), AOO-achtergronddocument 91-04.
- Hoeven, W.F. ter en E. Sluimer, 1993. *Richtlijn onderafdichtingsconstructies voor stort- en opslagplaatsen*. Den Haag, Ministerie van VROM, Directoraat-Generaal Milieubeheer, Directie Bodem.
- Hoeven, W.F. ter, M.J.J. van der Weiden en F.R.Goossensen, 1993. *Richtlijn drainagesystemen en controlesystemen grondwater voor stort- en opslagplaatsen*. Den Haag, Ministerie van VROM, Directoraat-Generaal Milieubeheer, Directie Bodem.
- Idema, L.R. en J.Schuur, 1992. 'Rationeel kiezen van lokatie voor afvalverwerking'. *ROM*, nr.11.



IWACO, 1993. *Centrale Slenk Model*, 's Hertogenbosch, IWACO.

Ommen, H.C. van, 1990. 'Lange termijn beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit bij berging van baggerspecie onder (grond)water'. *H<sub>2</sub>O*, 4: 107-110.

Pastors, M.J.H., 1992. *Landelijk Grondwater Model; berekeningsresultaten. Onderzoek effecten grondwaterwinning*. Bilthoven, RIVM, Rapport nr. 714305005.

Peerboom, J.M.P.M., 1990. *Waterhuishoudkundige schadefuncties op grasland*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 43.

Rijks Geologische Dienst, 1925-1952. *Geologische Kaart van Nederland, 173 bladen*. Haarlem, Rijks Geologische Dienst.

Stichting voor Bodemkartering, 1965. *De bodem van Nederland. Toelichting bij de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 250 000*, Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.

Striegel, K.H., 1993. *Search procedure for hazardous waste landfill sites in Northrhine-Westfalia, Germany*. In: Arnould, M., M. Barrès and B. Côme (eds.), 1993. *Geology and Confinement of Toxic Wastes*. Rotterdam, A.A.Balkema.

Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. *Cultuurtechnisch Vademecum*. Utrecht, Cultuurtechnische Vereniging, Postbus 20021 (3502 LA).

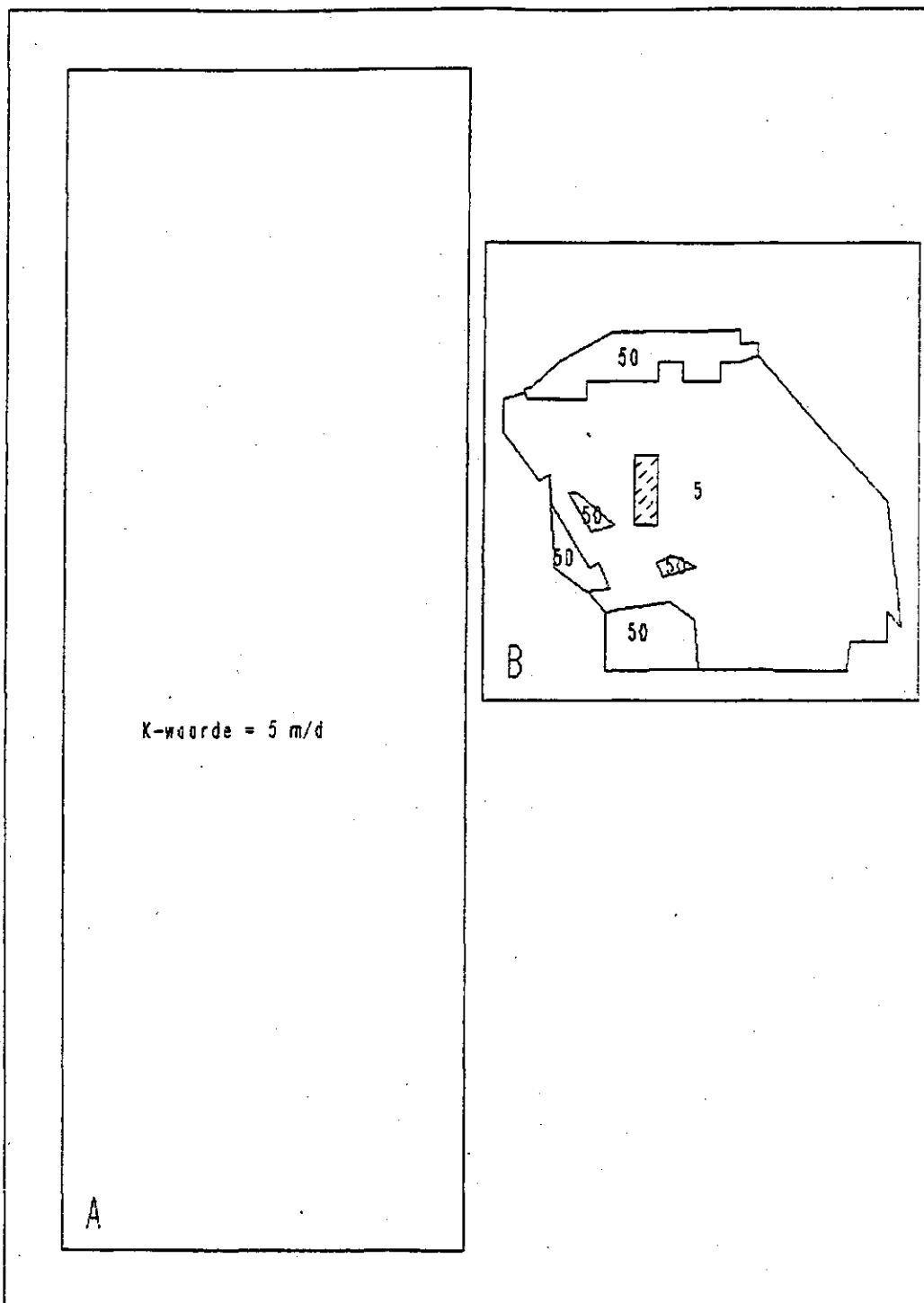
#### ***Niet-gepubliceerde bronnen***

Boels, D., 1983. Deelrapport I. *Hydrologische en grondmechanische gevolgen van polderpeilverlaging (een toepassing van de programma's STAT, TDSATU en ZETTING)*. Wageningen, ICW, nota 1466.

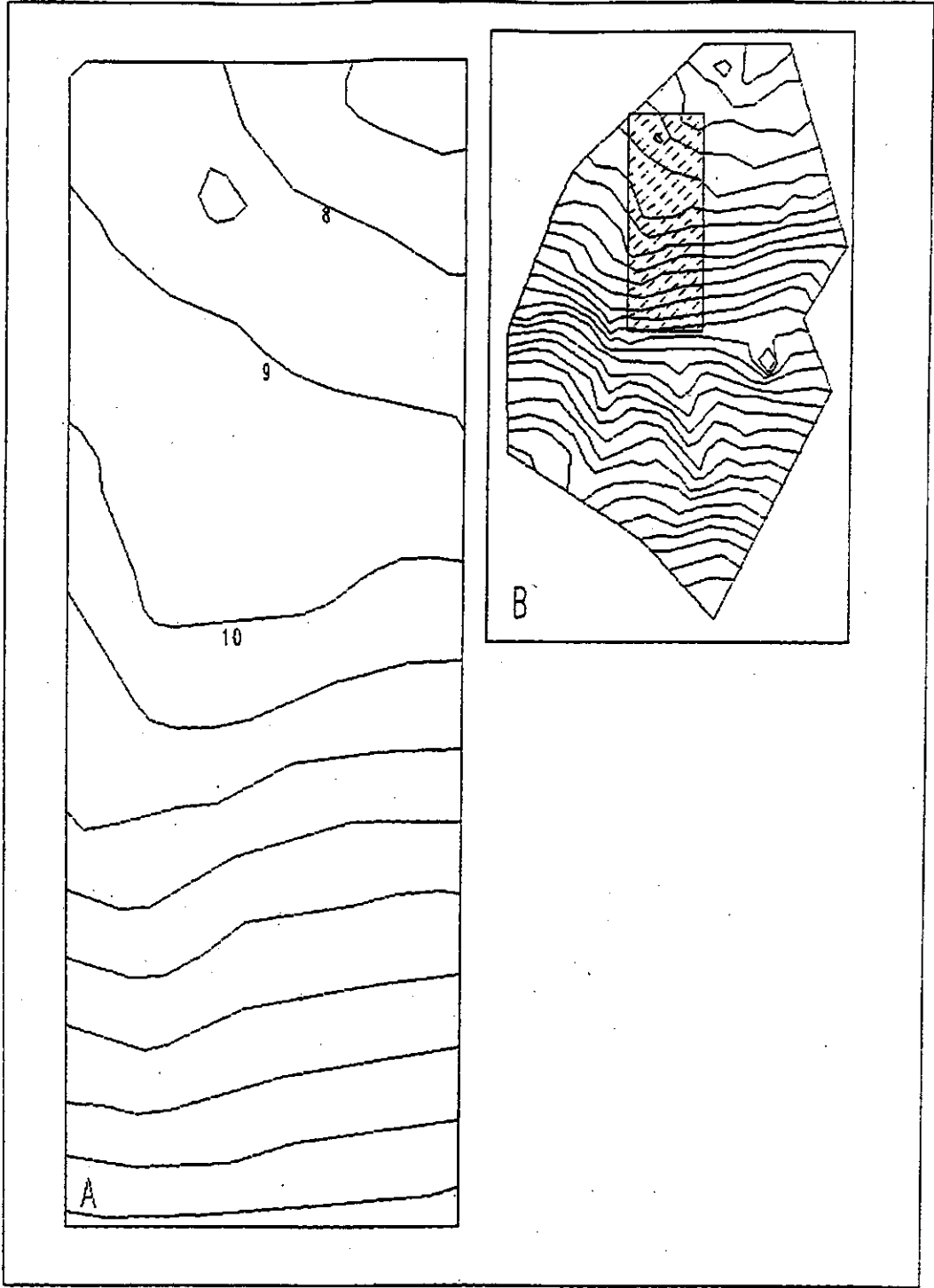
Ernst, L.F., 1972. *De bepaling van de transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zone*. Wageningen, ICW, Nota 755.

Gijsberts, C.P., 1991. *Locatiecritewria voor afvalstortplaatsen, een checklist*. Nijmegen, K.U. Nijmegen, Vakgroep Milieu, Natuur en Landschap.

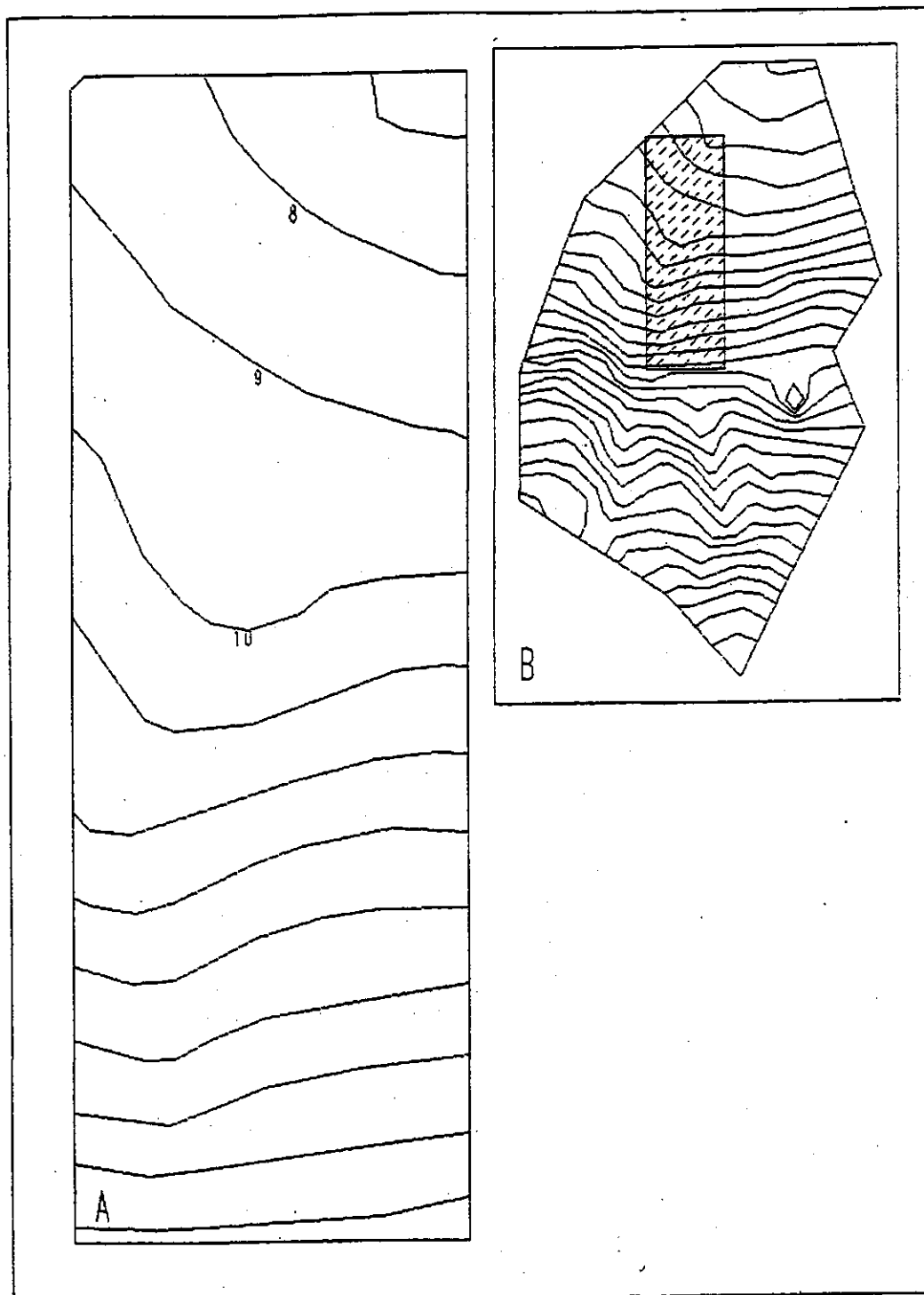
**Aanhangsel 1 Basiskaart met k-waarden van het eerste watervoerende pakket**



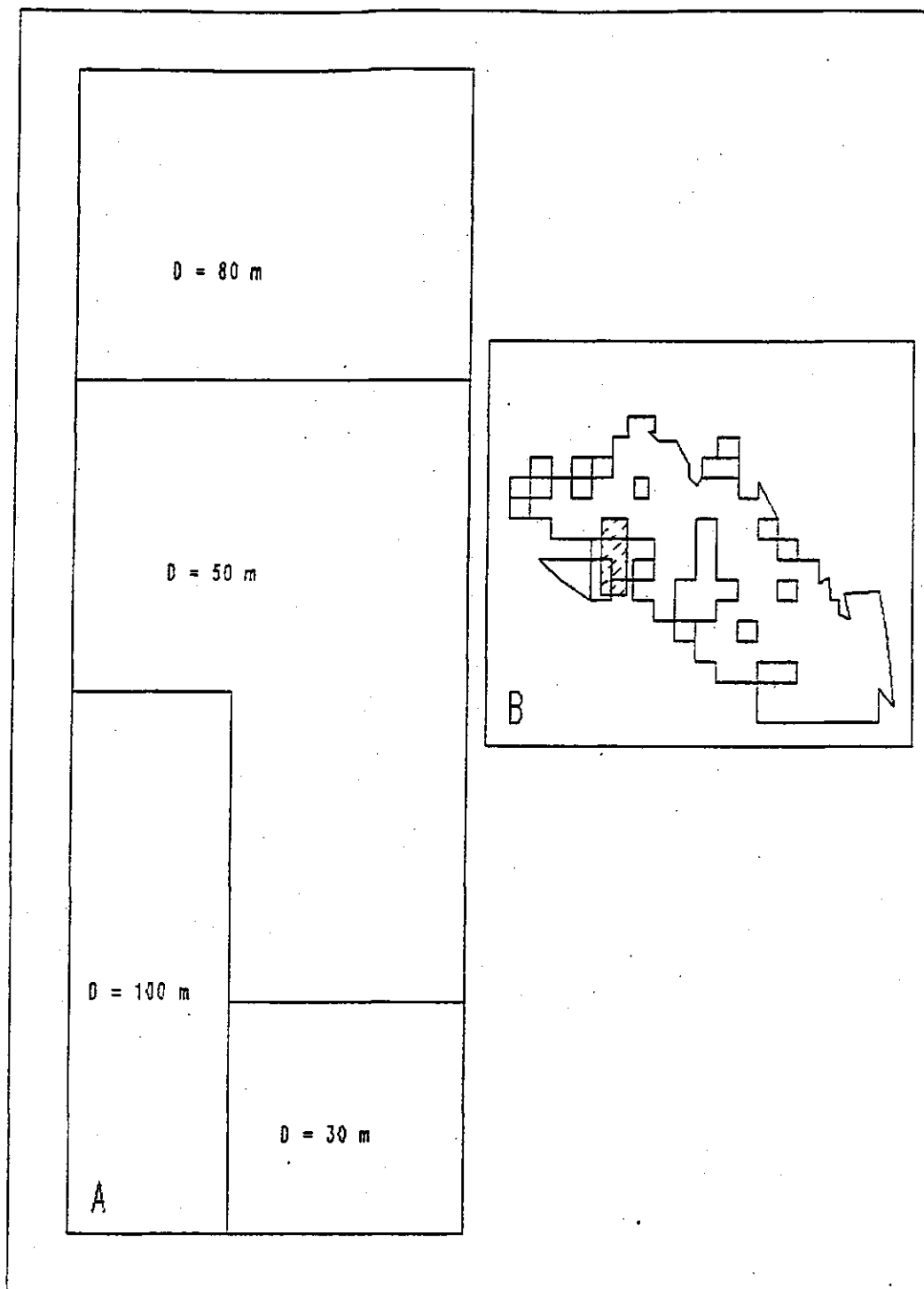
**Aanhangsel 2 Basiskaart met isohypsen van het eerste watervoerende pakket**



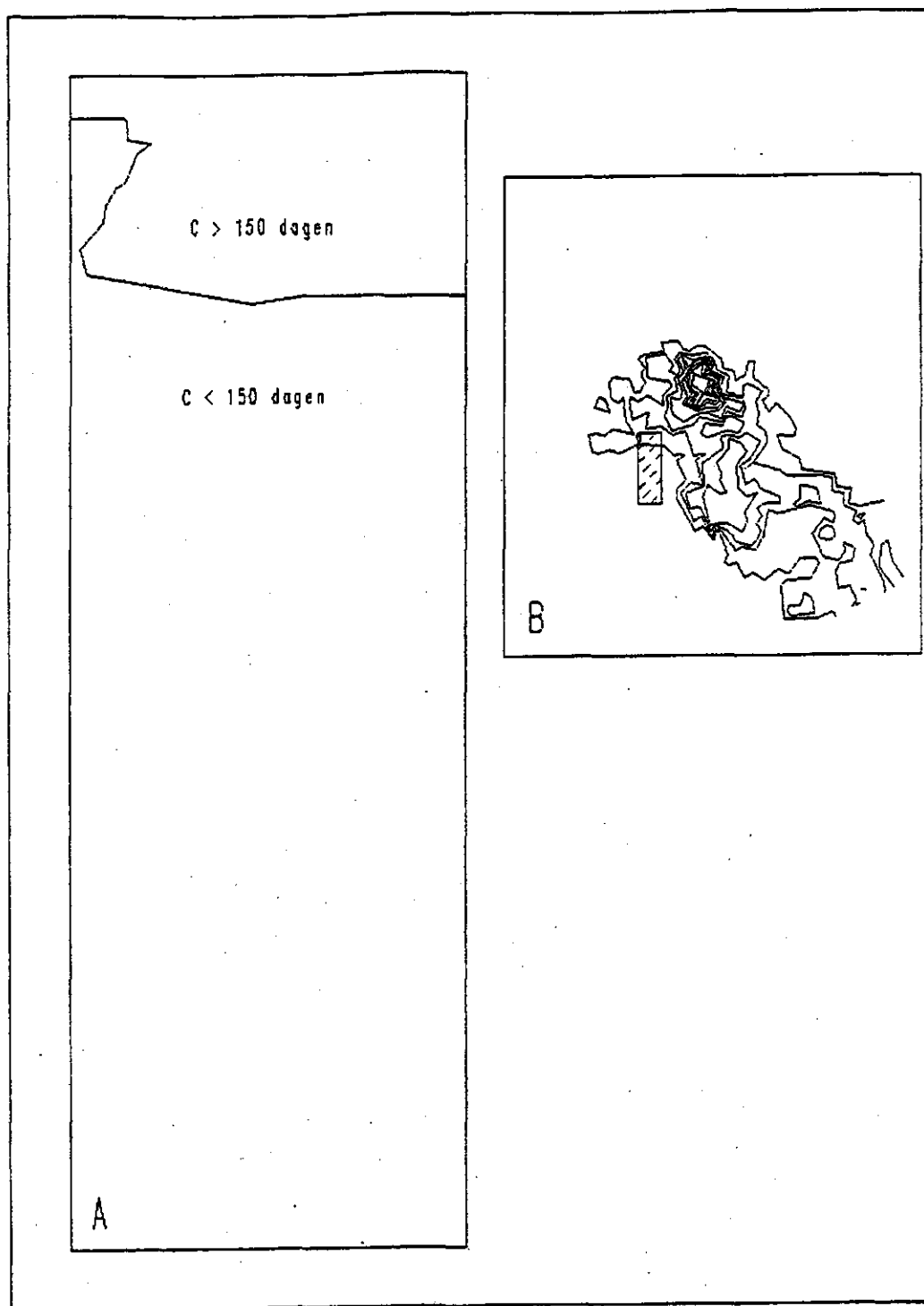
**Aanhangsel 3 Basiskaart met isohypsen van het tweede watervoerende pakket**



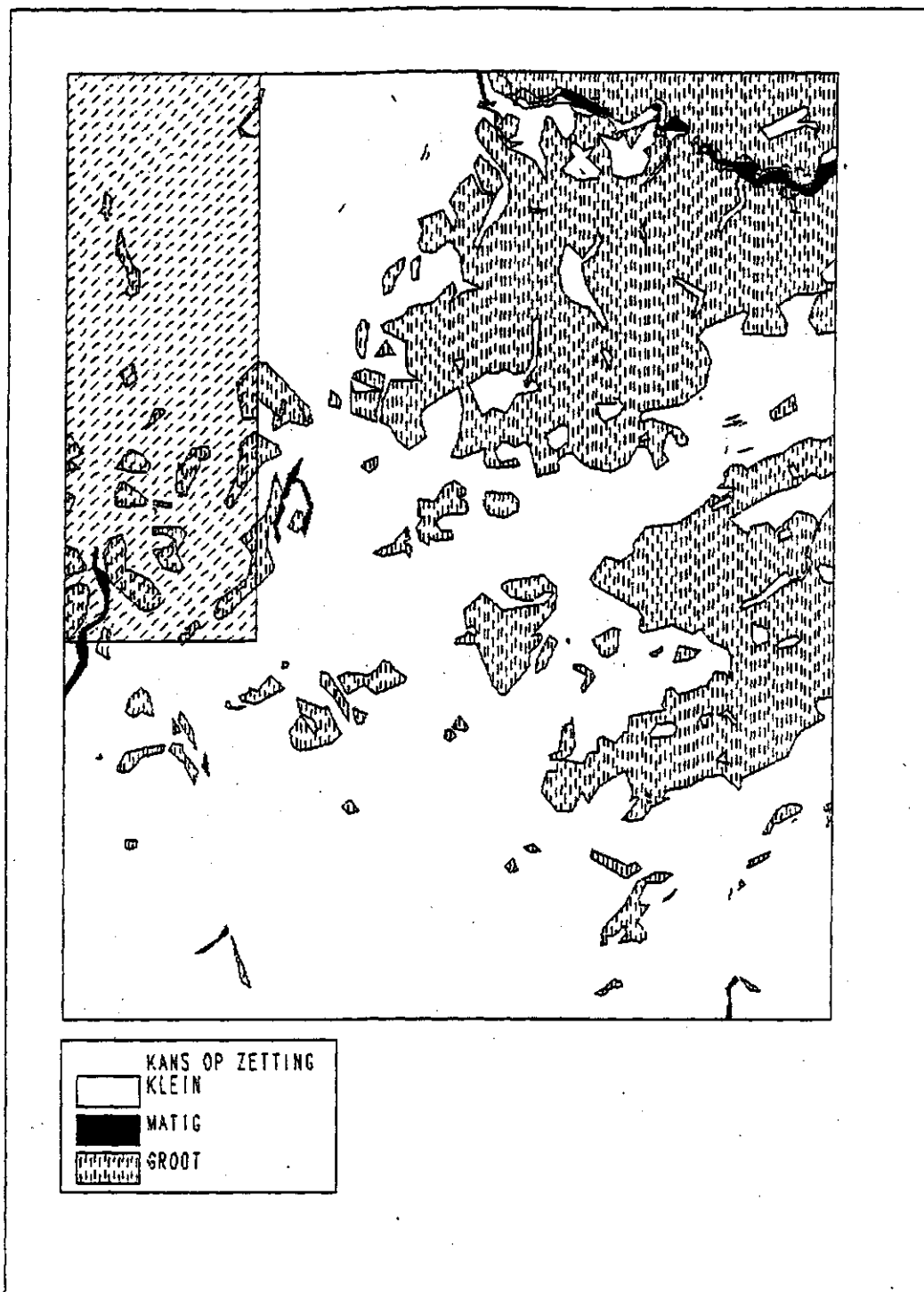
**Aanhangsel 4 Basiskaart met dikten van het eerste watervoerende pakket**



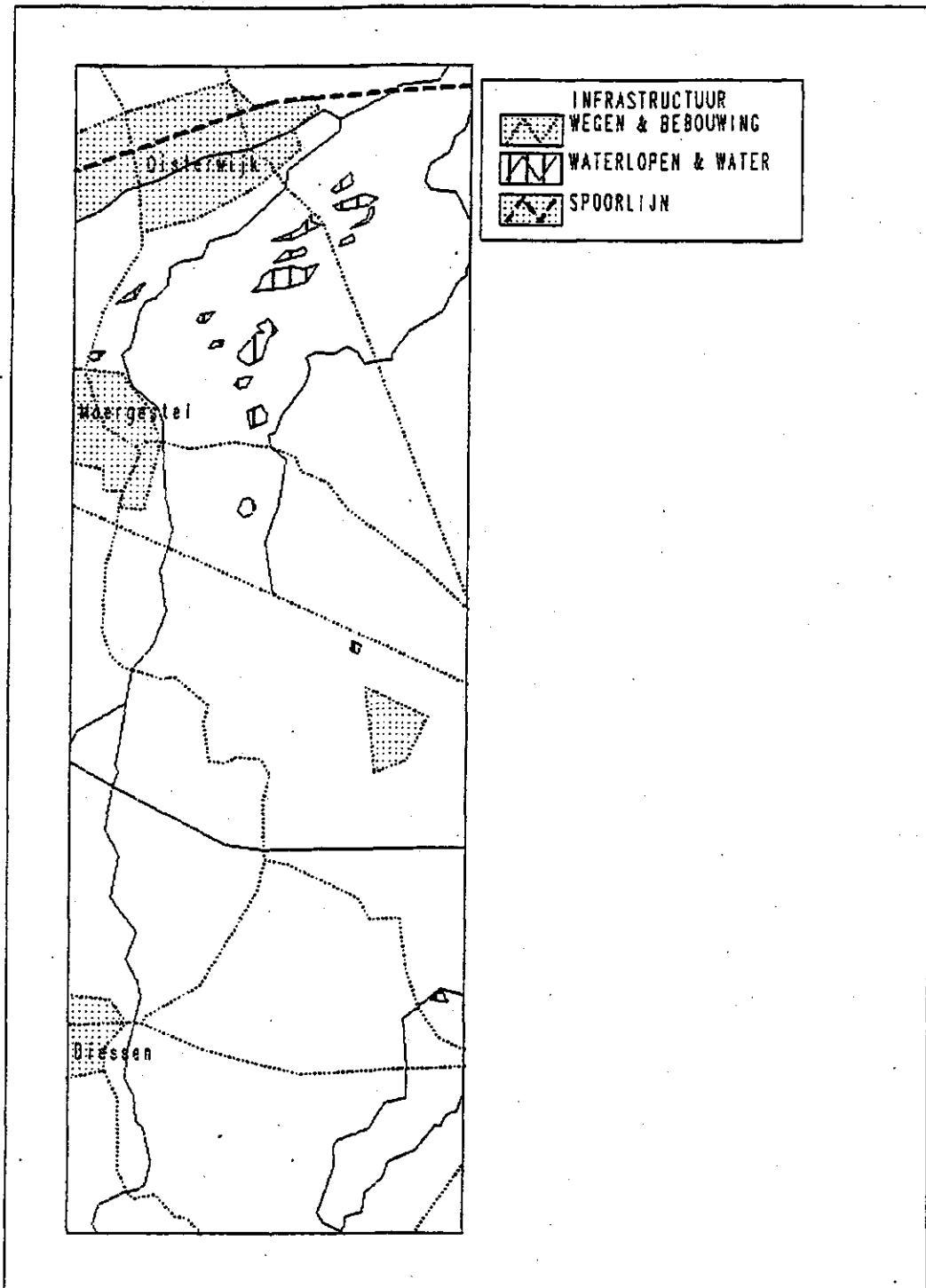
**Aanhangsel 5 Basiskaart met c-waarden van de eerste scheidende laag**



**Aanhangsel 6 Basiskaart met de van de Geologische kaart  
(kaartblad 51-west) afgeleide zettingenkaart**

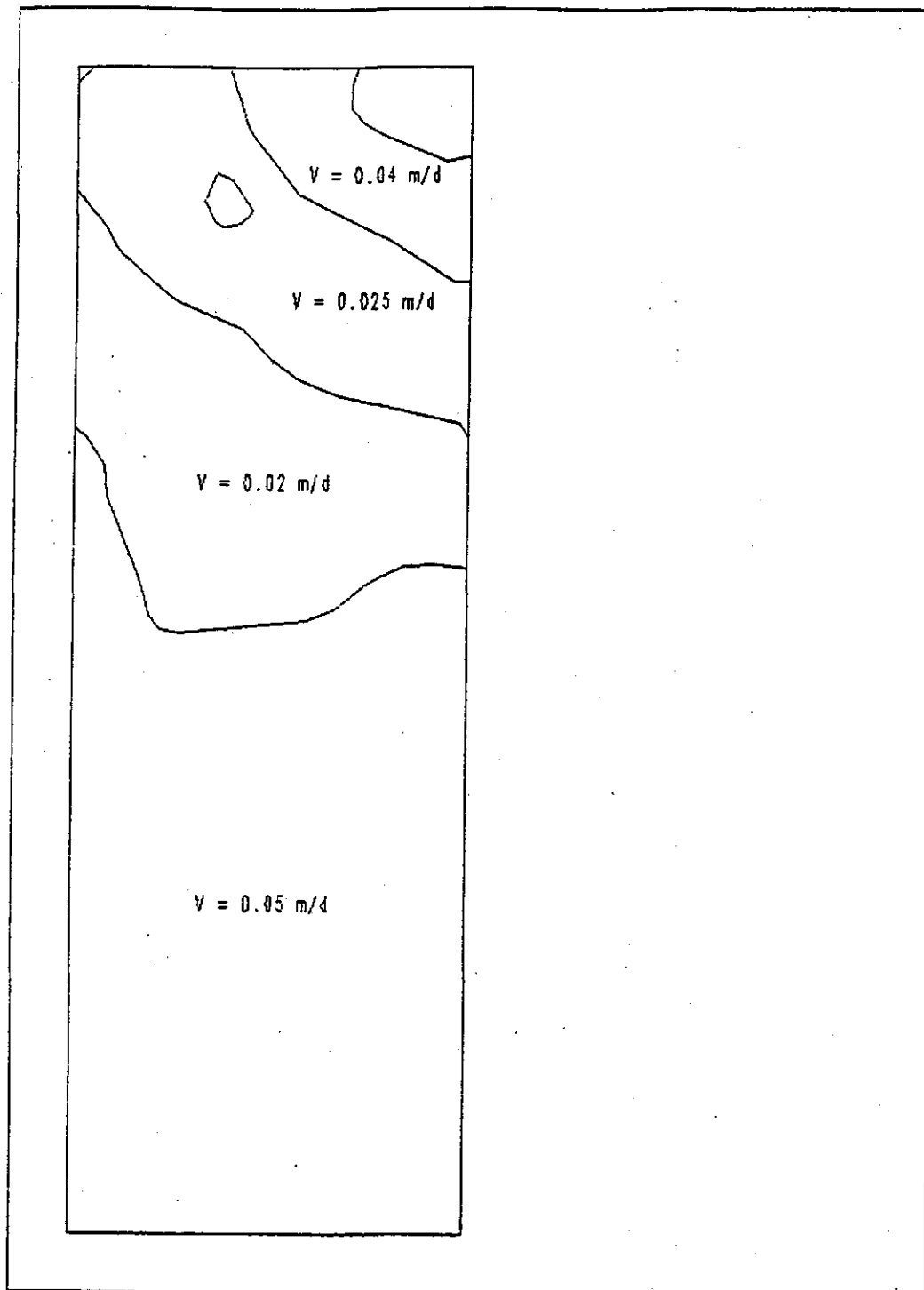


**Aanhangsel 7 Gedigitaliseerde topologische kaart van het proefgebied**

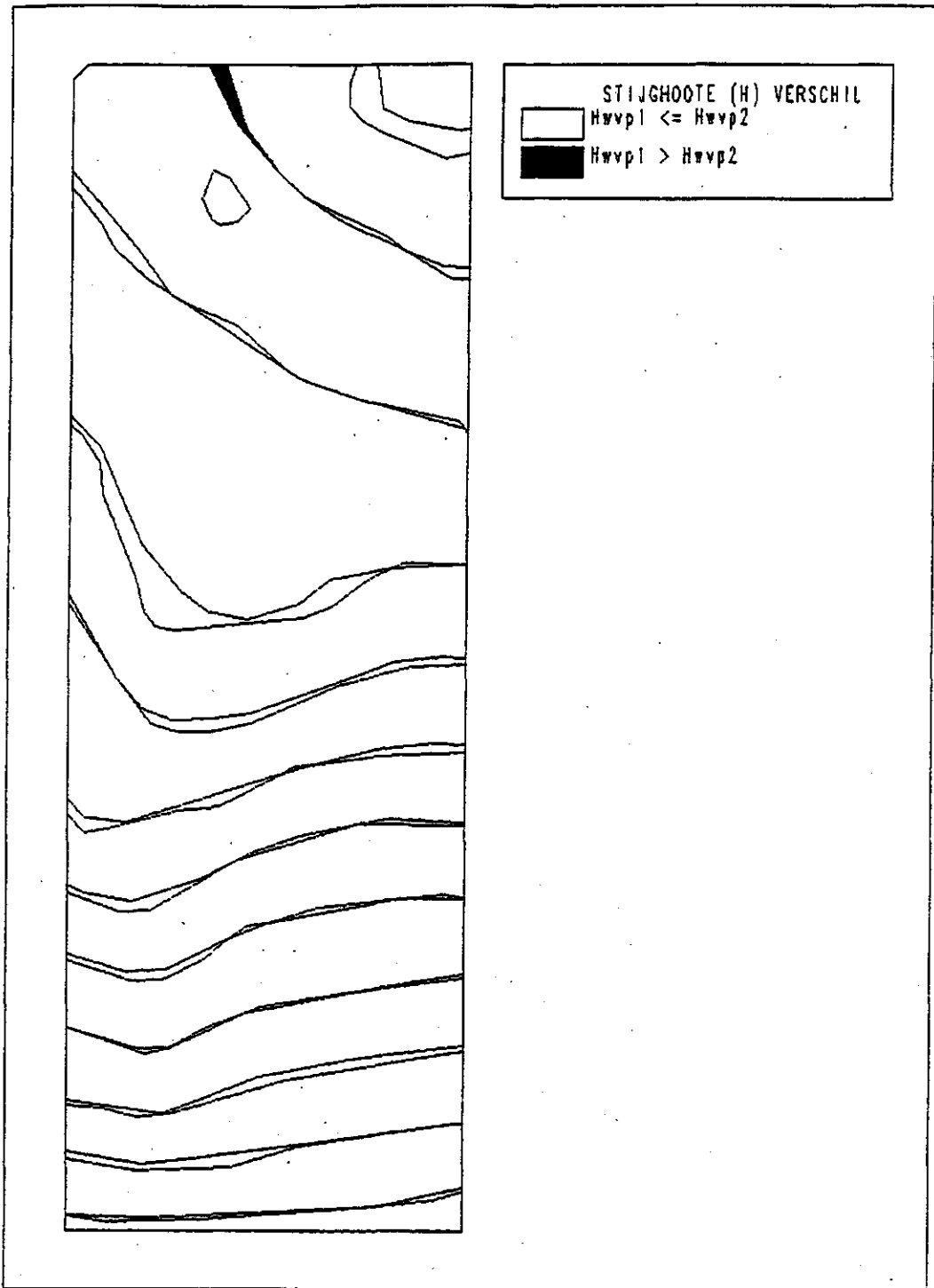




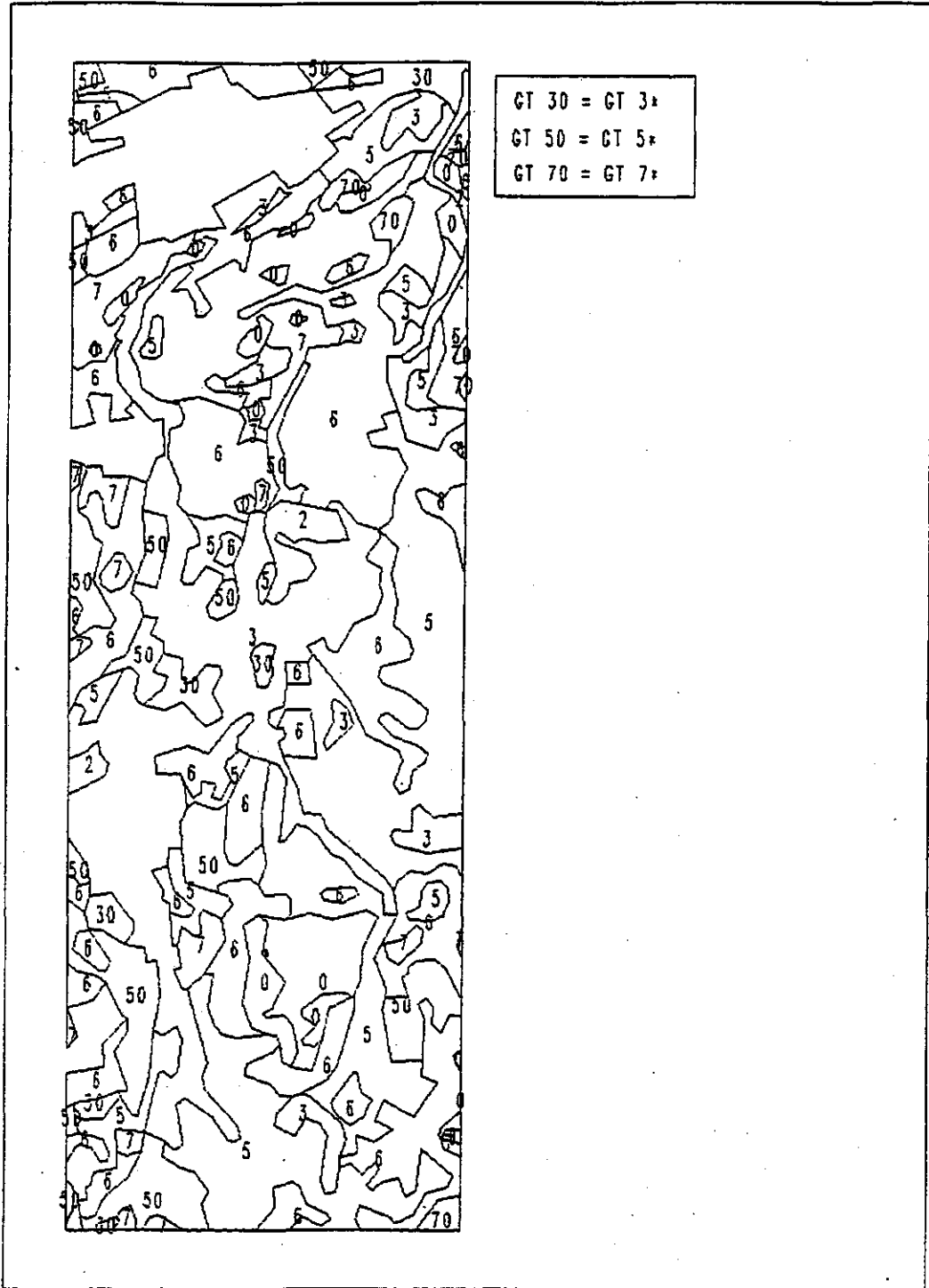
**Aanhangsel 8 Afgeleide basiskaart met stroomsnelheden in het eerste watervoerende pakket voor het proefgebied**



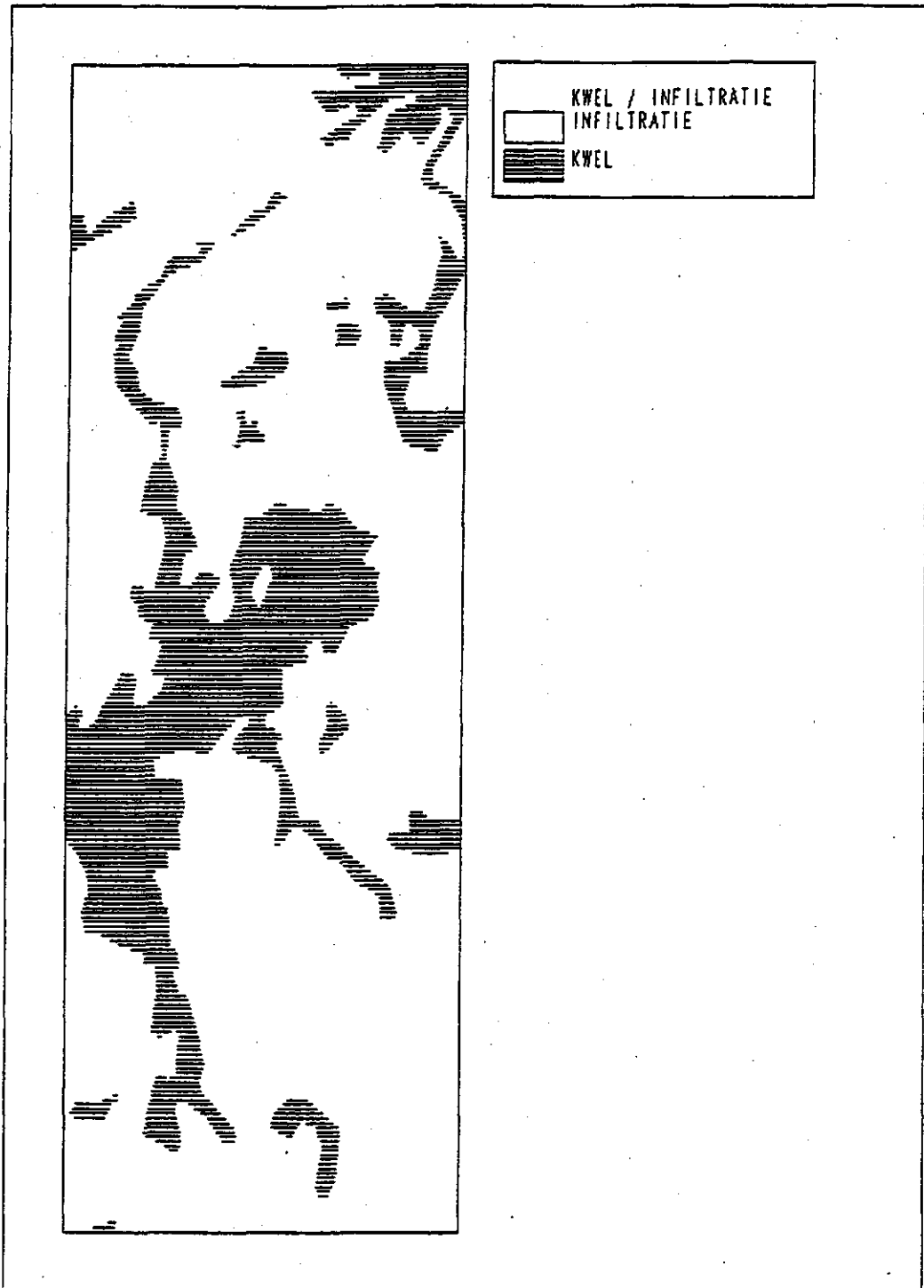
**Aanhangsel 9 Afgeleide basiskaart met daarop aangegeven de verhouding tussen de stijghoogten van het eerste en tweede pakket**



# Aanhangsel 10 Grondwatertrappenkaart voor het proefgebied



**Aanhangsel 11 Kaart met daarop aangegeven het voorkomen van kwel en infiltratiegebieden in het proefgebied**



**Aanhangsel 12 Kaart met daarop aangegeven de gebieden in het proefgebied waar kans is op een diepe grondwaterstand**

