# KARTERING VAN HET PERCENTAGE SLIB OP DE DROOGVALLENDE DELEN IN DE WESTERSCHELDE MET LANDSAT THEMATIC MAPPER

Maart 1996
MD-GAT 9617 / MD-GAR 9618

| | | |
|---|---|---|
| Rapportnummer | : | MD-GAT 9617 / MD-GAR 9618 |
| Titel | : | Kartering van het percentage slib op de droogvallende delen in de Westerschelde met Landsat Thematic Mapper |
| Uitgave | : | Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst<br>Postbus 5023<br>2600 GA Delft<br>tel: 015 2 691 111<br>fax: 015 2 618 962 |
| Opdrachtgever | : | Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee |
| Beeldverwerking | : | H.J. den Hollander, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst |
| Auteur | : | J.M.M. Kokke, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst |
| Contactpersoon | : | S..J. Fraikin, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst<br>tel. 015 2 691 277 |
| Druk | : | Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst<br>Afdeling Grafische Technieken |

© 1996, RWS Meetkundige Dienst

**Inhoudsopgave**


| | | |
|---|---|---|
| | Samenvatting | 5 |
| 1. | Inleiding | 7 |
| 1.1 | Wat vooraf ging | 7 |
| 1.2 | Het hier beschreven project | 7 |
| 1.3 | De indeling van het rapport | 8 |
| 2. | Bodemsamenstellingskartering op basis van de 'kleur' van de bodem; mogelijkheden met Landsat Thematic Mapper. | 9 |
| 2.1 | Onderscheid naar kleur | 9 |
| 2.2 | Wat ziet Landsat TM? | 10 |
| 3. | Van satellietbeeld naar slib-percentage kaart. | 11 |
| 3.1 | De beschikbare gegevens | 11 |
| 3.2 | Het slib-percentage-algoritme; ontwikkeling en toepassing | 11 |
| 3.3 | Generalisatie / Slibkartering van het gehele Westerschelde-gebied | 12 |
| 3.4 | De beeldverwerking | 13 |
| 4. | Het resultaat: interpretatie en discussie | 15 |
| 4.1 | Aspecten van interpretatie | 15 |
| 4.2 | Aspecten van beeldverwerking | 15 |
| 4.2.1 | Ruimtelijke resolutie en classificatie-resultaten | 15 |
| 4.2.2 | Effecten van geometrische onnauwkeurigheid | 16 |
| 4.2.3 | Betrouwbaarheid van het slib-percentage-algoritme | 17 |
| 4.2.4 | Robuustheid van het slib-percentage-algoritme | 17 |
| 4.2.5 | Stabiliteit van het slib-percentage-algoritme. | 17 |
| 5. | Blik op de toekomst | 25 |
| 5.1 | Verificatie en verdere ontwikkeling van de methode | 25 |
| 5.2 | Monitoring | 25 |
| 5.3 | Enkele overwegingen | 26 |
| 6. | Referenties | 27 |
| Bijlage 1: | Aanvullende informatie over de Landsat TM sensor | 29 |
| Bijlage 2: | Waterstands-informatie Westerscheldegebied 7 september 1993. | 31 |

**Samenvatting**

In opdracht van RIKZ (vestiging Middelburg) is een slibkartering verricht van het Westerschelde-gebied op basis van Landsat Thematic Mapper remote sensing gegevens. Combinatie van remote sensing gegevens met in situ McLaren bemonsteringsgegevens omtrent de sedimentsamenstelling op de Plaat van Walsoorden heeft een algoritme opgeleverd waarmee het remote sensing beeld kan worden omgezet in een slibkaart. Dit algoritme is toegepast op alle kale delen in het gehele Westerschelde-gebied.

De volgende beeldverwerkings-stappen worden doorlopen:

1. Het beeld is geometrisch gecorrigeerd,
3. Op basis van de optische informatie van de sensor is gemakkelijk onderscheid mogelijk tussen 'water' en 'land',
2. Buitendijks gebied is van binnendijks gebied onderscheiden met behulp van informatie omtrent de ligging van de dijken,
4. Op basis van informatie van de remote sensing informatie is in de categorie 'land' discriminatie mogelijk tussen 'kale bodem' en 'vegetatie'
5. Het slib-percentage-algoritme is toegepast op alle pixels uit de categorie 'kale bodem'; een het resultaat wordt in een zestal klassen gepresenteerd (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 en >50% slib)
6. In de categorie vegetatie is, ook op basis van de informatie van de TM sensor, een kwalitatieve vegetatie-classificatie aangebracht door gebruik te maken van de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), die informatie verschaft over bedekking/biomassa van de vegetatie.
7. De NAP -2.5 m. dieptelijn (lodingen 1992) was beschikbaar
8. Het eindprodukt is de samenvoeging van de vijf op deze wijze verkregen informatielagen water, binnendijks gebied, buitendijksgebied met slib-classificatie, buitendijksgebied, gedomineerd door vegetatie en de NAP -2.5 m. dieptelijn. De geclassificeerde buitendijkse gebieden zijn in kleur weergegeven, de overige informatie in grijstinten.

Het algoritme is gevalideerd met behulp van een beperkte set McLaren bemonsteringsgegevens van de Plaat van Walsoorden. Toetsing van de resultaten door vergelijking met in situ McLaren bemonsteringsgegevens van het gehele Westerscheldegebied, daterend uit 1992-1993 kan uitsluitsel geven over de vraag of de methode voldoende robuust is om te kunnen toepassen in de hele Westerschelde.
De ontwikkelde methode biedt perspectieven met betrekking tot ontwikkeling van een methode, die ook direct toepasbaar is op satelliet gegevens van andere datum. Het algoritme is nu gebaseerd op gegevens zoals de satelliet die meet, inclusief de in temporele en ruimtelijke zin variabele effecten van licht-verstrooiing en -absorptie in de atmosfeer. Om een methode te ontwikkelen, die ook direct toepasbaar is op remote sensing beelden van andere datum, moet het te gebruiken algoritme gebaseerd zijn op remote sensing gegevens, die reeds voor deze atmosferische effecten zijn gecorrigeerd en nog slechts informatie over het oppervlak bevatten. De methode is dan ook toepasbaar in andere gebieden, zoals het Waddengebied.
De methode biedt mogelijkheden voor kartering en monitoring van ligging van platen en geulen en van de slibvoorkomens op de platen en langs de oevers.
Presentatie van de resultaten in een Geografisch Informatie Systeem is desgewenst mogelijk, evenals combinatie met anderssoortige informatie uit hetzelfde of andere remote sensing beelden of uit andere bronnen. Voor het maken van globale overzichten is het ruimtelijk detail (30x30 $m^2$) van deze sensor (Landsat TM) voldoende; wanneer gedetailleerdere ruimtelijke informatie nodig is, kan men gebruik maken van vliegtuig remote sensing. Voordelen daarvan zijn o.a.: kleinere beeldelementen (enkele $m^2$) en flexibele inzetbaarheid.

# 1. Inleiding

## 1.1 Wat vooraf ging

In 1993-1994 heeft de afdeling Remote Sensing van de Meetkundige Dienst toepassingsgericht onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden voor kartering van de sedimentsamenstelling van permanent droge en drooggevallen delen in een intergetijdegebied met gebruikmaking van optische remote sensing gegevens. Gegevens uit 1993 zijn geanalyseerd ten behoeve van een kleinschalige kwantitatieve slib-kartering van een plaat in de Westerschelde, de Plaat van Walsoorden. In dat experiment zijn zowel de meer traditionele satellietgegevens (van de Landsat Thematic Mapper (TM) sensor) gebruikt als ook gegevens, die werden opgenomen met een remote sensor aan boord van een vliegtuig. Op deze wijze kon ervaring worden opgedaan met vliegtuig remote sensing en kon eveneens bezien worden of een vliegtuig remote sensor doorslaggevende voordelen heeft ten opzichte van het gebruik van gegevens afkomstig van een satelliet-sensor. Mogelijke voordelen van vliegtuig remote sensing zijn: flexibele inzetbaarheid, (veel) meer ruimtelijk detail, beter spectraal scheidend vermogen en instelbaarheid. Daartegenover staan nog de moeizame en tijdrovende organisatie van vliegtuig remote sensing campagnes, problemen met kartering van grotere gebieden, relatief lange verwerkingstijd en hoge kosten.
Het bovengenoemde experiment heeft geresulteerd in een slib-percentage-kaart van de Plaat van Walsoorden, waarvan de resultaten aan de hand van een beperkte validatie-set van bodemmonstergegevens van dezelfde plaat zijn gevalideerd.
Het betreffende experiment wees uit dat kartering van het slib-percentage in kwalitatieve zin goed mogelijk is. Een kwantitatieve kartering van het slibgehalte met behulp van remote sensing wordt o.a. bemoeilijkt door:

- schaalverschillen tussen bodembemonsteringsgegevens en remote sensing gegevens, waardoor een optimale koppeling tussen beide bemoeilijkt wordt,
- plaatselijke aanwezigheid van een laagje water op het sediment,
- het feit dat een remote sensor slechts het toplaagje van het sediment beschouwt, waar een bodemmonster typisch tot 5 cm diepte gaat.

Voor rapportage van het betreffende onderzoek zij de lezer verwezen naar Kokke (1994).

## 1.2 Het hier beschreven project

Bij nadere beschouwing van de resultaten werd geconcludeerd dat het ruimtelijk detail dat met kartering van de Landsat TM satelliet wordt bereikt (beeldelementen van 30x30 $m^2$) voldoende is voor een globale kartering van de bodemsamenstelling van een gebied als de Westerschelde. Voorts verschaft de TM-sensor in principe voldoende spectrale informatie om op basis van verschillen in 'kleur' informatie over bodemsamenstelling in kaart te brengen. In het licht van de nu nog beperkte beschikbaarheid van geschikte vliegtuig remote sensing apparatuur in Nederland en de overige genoemde nadelen van vliegtuig remote sensing ligt voor grootschalige kartering en monitoring een primaire keuze voor het gebruik van satelliet gegevens voor de hand. In het geval van slibkartering in een intergetijdegebied moet men daarbij wel accepteren dat over het algemeen slechts maximaal enkele keren per jaar een voor deze kartering geschikt Landsat-beeld van het betreffende gebied beschikbaar komt.

Op basis van de resultaten van het genoemde onderzoek en bovenstaande overwegingen is in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (vestiging Middelburg, contactpersoon drs. C. Storm) met behulp van dezelfde satellietopname een grootschalige slib-percentage-kartering uitgevoerd voor álle ten tijde van de satelliet-passage niet onder water staande gedeelten van de Westerschelde.

## 1.3 De indeling van het rapport

In hoofdstuk 2 wordt kort de fysische achtergrond van het karteren van bodemsamenstelling met behulp van passieve remote sensing toegelicht en krijgen de mogelijkheden van kartering met behulp van de Landsat TM sensor speciale aandacht. Hoofdstuk 3 gaat in op de totstandkoming van het algoritme ter bepaling van het slib-percentage en de verwerking van het satellietbeeld tot een geclassificeerd beeld met kwantitatieve informatie over slibgehalten. Hoofdstuk 4 is gewijd aan een discussie omtrent het resultaat en aspecten van interpretatie van het geclassificeerde beeld, terwijl in hoofdstuk 5 aanbevelingen en plannen voor de toekomst worden behandeld.

## 2. Bodemsamenstellingskartering op basis van de 'kleur' van de bodem; mogelijkheden met Landsat Thematic Mapper.

### 2.1 Onderscheid naar kleur.

De 'kleur' van een object wordt bepaald door:

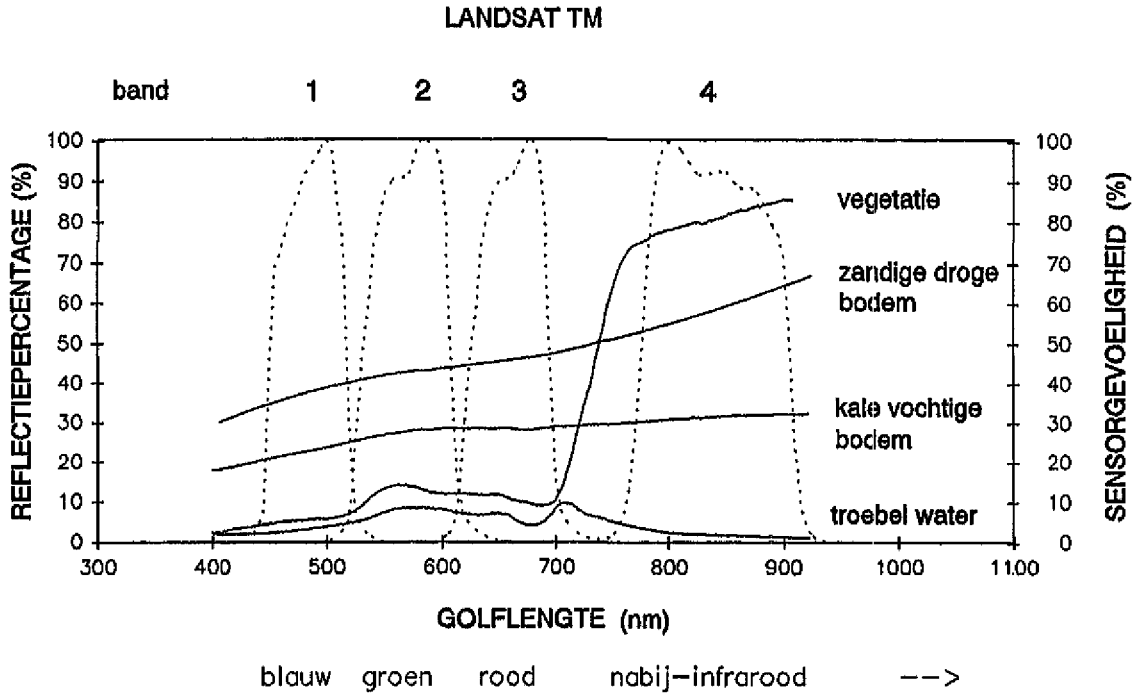
1. de 'kleur' van het licht dat erop valt
2. de hoeveelheid licht die het reflecteert
3. de afstand van waaraf men het object waarneemt
4. de gevoeligheid van het oog, de camera of scanner waarmee het object wordt waargenomen.

ad 1.
In het geval dat gebruik gemaakt wordt van passieve remote sensing, zoals in dit project, hebben we te maken met de zon als lichtbron. Zonlicht bevat licht van een groot aantal golflengten; de kleur van het zonlicht wordt bepaald door de hoeveelheid (licht)energie die de zon voor elk van die golflengten uitzendt, ofwel door de samenstelling van de lichtenergie (het spectrum).
Het zonlicht reist door de atmosfeer naar het aardoppervlak en wordt in de atmosfeer verstrooid door zwevende deeltjes en geabsorbeerd door de in de atmosfeer aanwezige gassen. De samenstelling van de atmosfeer is niet altijd en overal dezelfde; het gevolg is dat het zonlicht bij aankomst aan het aardoppervlak niet altijd en overal dezelfde 'kleur' heeft.
ad 2.
Een object aan het aardoppervlak zal voor elke golflengte een deel van de opvallende lichtenergie absorberen en een deel reflecteren. De samenstelling van het gereflecteerde deel bepaalt kleur en tint van het object onder de gegeven lichtomstandigheden. Hoewel eenzelfde niet veranderend object niet onder alle omstandigheden dezelfde kleur heeft mogen de reflecterende eigenschappen constant worden verondersteld, zodat kleurverschillen in de loop van de tijd slechts worden bepaald door kleurverschillen in het opvallende licht.
ad 3.
Naarmate het object van grotere afstand wordt beschouwd zal de al genoemde atmosferische invloed zich weer doen gelden; dit heeft tot gevolg dat een object, bekeken aan het aardoppervlak, een andere kleur kan hebben dan wanneer het door een satellietsensor wordt gezien.
ad 4.
Tenslotte heeft de kleur-gevoeligheid van de gebruikte sensor invloed op de waargenomen kleur van het object. Het menselijk oog kan alle golflengten tussen $\pm 400$ en $\pm 700$ nanometer waarnemen (dit deel van het spectrum wordt het 'zichtbare' spectrum genoemd en bevat de kleuren blauw, groen, rood en al hun mengvormen) en is in staat subtiele kleurverschillen waar te nemen. Toch heeft ieder individu zijn/haar eigen persoonlijke lichtgevoeligheid en (dus) eigen kleurwaarneming. Grotere interindividuele verschillen komen bijvoorbeeld tot uiting wanneer 'kleurenblindheid' voor een bepaalde kleur optreedt.

Een remote sensor heeft een kleurengevoeligheid waarover in de ontwerpfase is nagedacht en die het instrument geschikt maakt voor waarneming van bepaalde fenomenen. Om technologische redenen werden aanvankelijk scanners ontworpen met een beperkt aantal kleurgevoelige sensoren, die het spectrum opdelen in slechts enkele brede banden. Zij zijn gevoelig voor een bepaalde kleur en niet in staat de meer subtiele kleurverschillen waar te nemen.
Tegenwoordig is er duidelijk een trend in de richting van het gebruik van sensoren met vele kanalen die, analoog aan het menselijk oog, goed onderscheid kunnen maken tussen relatief kleine kleurverschillen. De zon zendt ook energie uit in golflengtegebieden, die niet in het gebied van het zichtbare spectrum liggen. Door nu sensoren te ontwerpen, die gevoelig zijn voor die golflengten, kan ook informatie worden ingewonnen, die onzichtbaar is voor het menselijk oog.

2.2 Wat ziet Landsat TM?

In dit project is gewerkt met de Thematic Mapper scanner aan boord van een Landsat-satelliet. Deze scanner verzamelt informatie in 7 golflengtebanden en is primair ontworpen om land waar te nemen. In figuur 1 is (stippel-lijnen) de gevoeligheid van de eerste 4 banden weergegeven. Van een aantal van deze banden is informatie in dit project gebruikt. Dit zijn de banden 1 en 2, resp. in het blauwe en rode deel van het (zichtbare) spectrum en band 4 in het nabij-infrarode deel van het spectrum.




Figuur 1: Enkele relevante reflectiespectra van kale bodem, vegetatie en water; toegevoegd is informatie over spectrale gevoeligheid van de TM banden.

De getoonde spectra manifesteren in deze TM-banden, die van elk object slechts een drietal kleurkenmerken registreren, zoveel significante onderlinge verschillen, dat deze informatie in principe voldoende is om:

1. water van land te onderscheiden
2. gebieden met vegetatie te onderscheiden van gebieden met kale bodem
3. in de gebieden met kale bodem een globale kwantitatieve classificatie van het slibgehalte teweeg te brengen
4. in de gebieden met een vegetatiedek een kwalitatieve classificatie met betrekking tot bedekkingsgraad of biomassa van de aanwezige vegetatie totstand te brengen.

Kale bodems vertonen typisch een met de golflengte toenemende reflectie zonder dominantie van bepaalde golflengten, hetgeen zich uit in vale kleuren. Al naar gelang de korrelgrootte en de (vaak daarmee samenhangende) vochthoudendheid, kan de reflectie toe- dan wel afnemen. Groene vegetatie vertoont in het zichtbare spectrum een lage reflectie, veroorzaakt door bladpigment-absorptie. Deze absorptie is relatief sterk voor rood licht; het lokale reflectiemaximum, dat daardoor optreedt in het groene gebied is verantwoordelijk voor de waargenomen groene kleur. Mede door de (zeer) hoge reflectie van groene vegetatie in het nabij-infrarode deel van het spectrum, waar de absorptie juist zeer gering is, is onderscheid tussen vegetatie en kale bodem mogelijk. Water is in het gehele beschouwde golflengtegebied donker tot zeer donker van kleur en kan zeer goed onderscheiden worden van de andere categorieën.

## 3. Van satellietbeeld naar slib-percentage-kaart.

### 3.1 De beschikbare gegevens

Er is recente informatie beschikbaar omtrent de bodemsamenstelling van het Westerscheldegebied. In september 1992 is een McLaren bodembemonstering uitgevoerd in het westelijke deel van de Westerschelde, in de late zomer en het najaar van 1993 in het oostelijke deel. Deze bemonsteringen vonden plaats op de snijpunten van een virtueel over het gebied gedrapeerd regelmatig 'vierkant rooster' met ribben van 500 meter (in gebieden met bekende of verwachte grotere dynamiek 250 meter).

Op 7 september 1993, een dag waarop de Landsat satelliet het Westerschelde-gebied bij relatief lage waterstand (zie ook bijlage 2) registreerde, werd op de Plaat van Walsoorden bij laag water een veldexperiment uitgevoerd met als resultaat informatie omtrent de sediment samenstelling én het bijbehorende reflectie-spectrum op 23 goed bekende locaties. De locaties werden zo gekozen dat in de genomen monsters de maximale variatie in bodemsamenstelling weerspiegeld werd.
Voorafgaand aan de monsterneming werd steeds informatie over de 'kleur' van het betreffende bodemmonster vastgelegd door het reflectie-spectrum van het monster te meten met een veldspectrometer met hoge spectrale resolutie (zie voor resultaat-voorbeelden de spectra van figuur 1).
De sedimentmonsters zijn op dezelfde wijze verwerkt als de McLaren monsters, zodat resultaten eventueel direct vergelijkbaar zouden zijn. De positie van de monsterpunten werd met behulp van dGPS bepaald, zodat in de fase van beeldverwerking in het Landsat TM beeld de met de monsterpunten overeenkomende beeldelementen (pixels) zouden kunnen worden gevonden.

### 3.2 Het slib-percentage-algoritme; ontwikkeling en toepassing

Voor de ontwikkeling c.q. bepaling van een algoritme dat de digitale informatie van het Landsat TM beeld omzet in een schatting van de sedimentsamenstelling is een goede geometrische correctie van het satellietbeeld noodzakelijk. Vervolgens kunnen die pixels in het beeld geïdentificeerd worden, die 'corresponderen' met de monsterpunten.
Het slib-percentage-algoritme is voor het betreffende Landsat-beeld bepaald via multivariate regressie, waarmee op basis van de satelliet-informatie en de corresponderende bodemsamenstellings-gegevens de 'beste' banden-combinatie werd gezocht voor de voorspelling van de bodemsamenstelling.
Voor ontwikkeling van het algoritme is gebruik gemaakt van de bodembemonsteringsgegevens, zoals die verzameld zijn op de dag, dat ook de satelliet-opname tot stand kwam op de al eerder genoemde 23 locaties. Informatie omtrent de korrelgrootte-verdeling van het sediment ter plekke van de monsterpunten werd gekoppeld aan de beschikbare spectrale informatie van de Landsat TM banden. Het resultaat van deze analyse was, dat combinatie van de TM banden 1 en 4 de grootste informatie-inhoud had met betrekking tot de korrelgrootte-verdeling.

Voor de Plaat van Walsoorden leidde deze procedure voor kartering van het slibgehalte (korrelgrootte $< 63\ \mu m$) tot het volgende algoritme:

SLIB-PERCENTAGE = 381.73 +3.98*TM1 -6.74*TM4
(correlatie-coëfficiënt: 0.821)

Het algoritme kan direct worden toegepast op de digitale informatie van die pixels, die geïdentificeerd zijn als behorende tot de klasse sediment.

## 3.3 Generalisatie / Slib-kartering van het gehele Westerschelde-gebied

Er werd een beperkte toetsing van het algoritme uitgevoerd door de resultaten van toepassing van het algoritme op die posities op de Plaat van Walsoorden, waarvoor op basis van de reguliere McLaren bemonstering op het regelmatig rooster bodemsamenstellingsgegevens beschikbaar waren te vergelijken met resultaten van McLaren bemonsteringen op andere locaties op dezelfde plaat.

Een score van $\pm 50\%$ correct geclassificeerde pixels was het resultaat, de overige pixels werden in meerderheid in naastgelegen klassen ingedeeld. Het synoptische overzicht, dat door een kartering als deze geboden wordt werd, zeker in kwalitatieve zin, door gebiedsdeskundigen als zeer waardevol ervaren.
Kartering van het gehele Westerschelde-gebied werd gezien als een logisch vervolg op het onderzoek. Uitgebreide verificatie met behulp van resultaten van de McLaren bemonsteringen uit '92 en '93 zou meer informatie kunnen verstrekken omtrent de mogelijkheden om op deze wijze kwantitatieve grootschalige slib-percentage-karteringen uit te voeren.

Besloten werd het algoritme, opgesteld op basis van de gegevens van de Plaat van Walsoorden, te generaliseren voor het gehele gebied en toe te passen op hetzelfde Landsat TM beeld, dat vrijwel het gehele gebied van interesse beslaat.

## 3.4 De beeldverwerking

De volgende sequentiële beeldverwerkings-stappen werden uitgevoerd.

1 GEOMETRISCHE CORRECTIE
Het beeld dient geometrisch goed gecorrigeerd te zijn, zowel ten behoeve van bepaling van het algoritme (zie boven) als ook voor combinatie met andere informatie omtrent het gebied, (zie bijv. stap 3 en stap 7 hieronder). Het Landsat-TM-beeld werd geometrisch gecorrigeerd op basis van koppeling van in het beeld goed herkenbare punten aan de bekende RD-coördinaten van die punten. Op deze wijze kan een geometrische nauwkeurigheid gehaald worden in de orde van 1 pixel (in dit geval dus 30 meter).

2 SCHEIDING LAND-WATER
Water is zeer goed te onderscheiden van de overige in het beeld voorkomende elementen door gebruik te maken van band 5. Water reflecteert slechts zeer weinig licht in die band.
Water wordt in het eindresultaat met behulp van TM band 5 weergegeven (vrijwel zwart).

3 SCHEIDING BINNEN- / BUITENDIJKSE GEBIEDEN
Het onderscheid tussen binnendijks en buitendijks gebied is gemaakt door gebruik te maken van een zgn. 'dijken-coverage' van het gebied. Randeffecten zijn mogelijk tengevolge van niet perfect 'op elkaar passen' van het geometrisch gecorrigeerd satellietbeeld en de dijkencoverage. Het binnendijkse gebied wordt in het eindresultaat in zwart-wit weergegeven (TM band 5).

4. SCHEIDING KALE BODEM / VEGETATIE
Door gebruik te maken van de NDVI (= Normalized Difference Vegetation Index) kan goed onderscheid gemaakt worden tussen vegetatie en kale bodems (zie o.a. Buiten en Clevers, 1990). Deze vegetatie-index is gedefinieerd als: NDVI = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3) en levert waarden op tussen -1 en +1. Relatief hoge waarden treden op voor pixels met hoge bedekking van vegetatie, terwijl pixels met alleen kale bodem waarden net boven 0 opleveren. Problemen kunnen zich voordoen bij pixels met zowel vegetatie als kale bodem (de zgn 'mixels'). Voor die pixels is eenduidige indeling in de categorie 'kale bodem' dan wel 'vegetatie' moeilijker, omdat de NDVI-waarde zal liggen tussen die voor kale bodem en die vegetatie-gedomineerde pixels.

In feite is door het volgen van de stappen 2 t/m 4 een viertal informatie-lagen gecreëerd:
1. water,
2. binnendijks gebied,
3. buitendijksgebied met kale bodem, en
4. buitendijks gebied met vegetatie

5. KARTERING SLIB-PERCENTAGE m.b.v. CLASSIFICATIE
Toepassing van het slib-percentage-algoritme resulteert in een geschat slibpercentage per pixel. Classificatie in een zestal kwantitatieve klassen leidt vervolgens tot een 'rustig' interpretabel beeld.

6. KARTERING VEGETATIE m.b.v. CLASSIFICATIE
De categorie 'vegetatie', tot stand gekomen via berekening van de NDVI, kan ook in klassen worden verdeeld, die kwalitatieve informatie verschaffen omtrent de vegetatie. De vegetatie-index zal toenemen met toenemende bedekkingsgraad en biomassa en tevens naarmate de conditie van de vegetatie beter is.

7. TOEVOEGING NAP -2.5 m LIJN
Als vijfde informatie-laag is tenslotte toegevoegd de NAP -2.5 m dieptelijn (1992), die overal juist buiten de gekarteerde gebieden ligt (zie ook getijde-informatie in bijlage 2).

8. INTEGRATIE VAN INFORMATIELAGEN
Samenvoeging van de 5 informatielagen in één beeld geschiedt door van elke informatielaag alle niet relevante informatie weg te laten (digitale waarde 0) en vervolgens alle beelden samen te voegen (via sommatie). In het eindresultaat zijn alle 'droge buitendijkse gebieden' in kleur weergegeven, de bruine tot rode tinten voor kale bodem, de groene voor vegetatie.

## 4. Het resultaat: interpretatie en discussie

### 4.1 Aspecten van interpretatie

De uit de beeldverwerking resulterende kaartprodukten zijn op de volgende pagina's van dit rapport weergegeven.
De eerste afbeelding toont een totaal-overzicht van het gekarteerde gebied, de kaders daarin geven de op de volgende afbeeldingen weergegeven deelgebieden aan. Het gehele gekarteerde gebied is in een viertal deelgebieden verdeeld, welke op een schaal van 1:75.000 zijn weergegeven.

De afbeeldingen geven een fraaie momentopname van de situatie in het Westerschelde gebied op 7 september 1993, ±11.10 uur MET (Middeleuropese tijd).
Duidelijk onderscheidbaar zijn de vijf informatie-lagen:

1 water
2 binnendijks gebied
3 buitendijks gebied gedomineerd door kale bodem
4 buitendijks gebied door vegetatie gedomineerd
5 NAP -2.5 m dieptelijn 1992.

Het buitendijks gebied is (exclusief het water) geheel in kleur weergegeven, de overige informatie-lagen in zwart-wit.

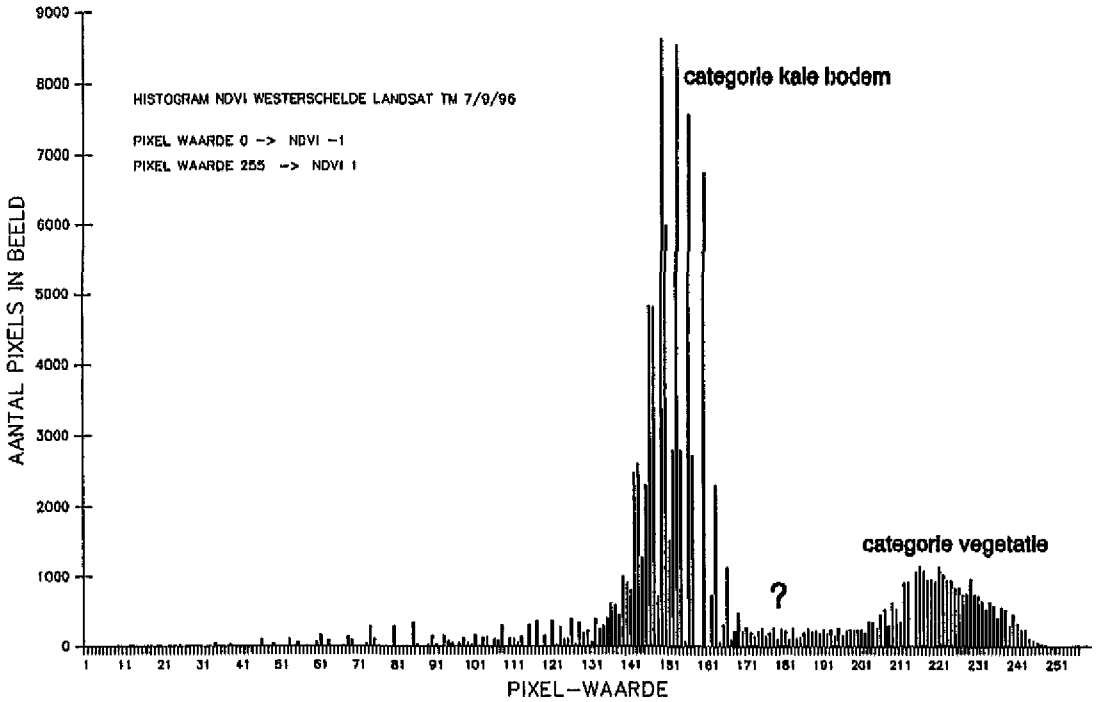
In de categorie vegetatie is een kwalitatieve differentiatie aangebracht door de numerieke resultaten van toepassing van de vegetatie-index in zes qua getalswaarden even brede klassen onder te verdelen, elk met een eigen groene tint. Een lage vegetatie-index kan wijzen op een relatief lage bedekkingsgraad, maar kan ook een uiting zijn van een geringere vitaliteit van de vegetatie op de betreffende lokatie of een indicatie zijn voor type/soort van vegetatie.
De categorie sediment, in 6 kwantitatieve klassen onderverdeeld, is in tinten varierend van geel (zandig, droog, 0-10% slib) tot rood (slibgehalte boven 50%) weergegeven.
Uit overleg met gebiedsdeskundigen kwam de indruk naar voren dat met name in de primaire schorren misclassificaties optreden. Zo werd naar aanleiding van een kwalitatieve beschouwing van de voorlopige resultaten naar voren gebracht dat in het Rammekensschor een grotere uitgebreidheid van het primaire schor aanwezig is dan uit de kartering met Landsat TM naar voren komt. Hetzelfde geldt bijvoorbeeld voor het Konijnenschor (Land van Saeftinge) en voor de Biezelingse Ham. Dit verschijnsel lijkt met name op te treden in gebieden met verspreid voorkomende Spartinapollen.
Het intergetijdegebied is voor een groot gedeelte opgenomen, zoals blijkt uit het vrijwel samenvallen van de land-water grens in het Landsat-beeld en de 1 jaar oudere NAP -2.5 m dieptelijn (lodingen 1992). Gezien de ten tijde van de satellietopname optredende waterstanden (zie bijlage 2) mag verwacht worden dat de niet onder water staande delen geheel omsloten worden door de -2.5 meter dieptelijn. Tussentijdse geul- en plaatmigraties zijn er de oorzaak van dat dit in enkele gebieden duidelijk niet het geval is.

### 4.2 Aspecten van beeldverwerking.

#### 4.2.1 Ruimtelijke resolutie en classificatie-resultaten

De beeldelementen van een Landsat TM beeld vertegenwoordigen een oppervlak van 30x30 $m^2$. De spectrale informatie (ofwel 'kleur') van elk beeldelement is een afspiegeling van alle in het beschouwde oppervlak voorkomende objecten. Naarmate er aan het oppervlak meer en grotere variaties optreden op een schaal kleiner dan de pixelafmetingen (hier dus 30 m) zal het betreffende pixel op basis van de spectrale informatie die de satelliet verschaft minder gemakkelijk te classificeren zijn.
Dit verschijnsel, dat inherent is aan classificatie van een remote sensing beeld, zal opvallender zijn naarmate het pixelformaat toeneemt en treedt op bij álle klasse-overgangen binnen een beeld.
In dit geval treedt het met name op de voorgrond bij de overgang van de categorieën 'kale bodem' en 'vegetatie'. Het springt vooral in het oog bij overgangen tussen slibrijke gebieden en gebieden met een lage vegetatie-index. De overgang tussen deze klassen is moeilijk of niet scherp te definiëren op basis van de spectrale informatie in een Landsat TM beeld. Met als ongewenst gevolg dat sommige

gebieden, die een gebiedsdeskundige graag in de categorie vegetatie ingedeeld wil zien, als kale bodem (meestal slibrijk) wordt geclassificeerd. In feite wordt de scheiding tussen deze beide klassen bewerkstelligd door gebruik te maken van de de informatie omtrent de vegetatie-index. Berekening van de vegetatie-index is toegepast op alle 'droge' pixels in de buitendijkse gebieden en is geïllustreerd in figuur 2.




Figuur 2: Het histogram van het NDVI-beeld (voor uitleg zie tekst).

Pixels met een relatief lage vegetatie-index behoren tot de categorie kale bodem, die met een hoge vegetatie-index tot de categorie vegetatie. In beeldverwerkingsstap 4. SCHEIDING KALE BODEM / VEGETATIE is aan de hand van inspectie van het beeld een 'drempelwaarde' geselecteerd om scheiding tussen de beide categorieën teweeg te brengen. Juist in het tussengebied tussen de beide categorieën ligt (een relatief gering) aantal pixels, die moeilijk toe te wijzen aan zijn aan een van beide klassen en kennelijk in een voor de gebiedsdeskundige ongewenste klasse terecht komen. Verfijning op dit punt is wellicht mogelijk via kritische inspectie van het beeld en door gebruikmaking van informatie uit band 4 van het Landsat TM beeld, die voor deze categorie pixels wellicht nog extra aanwijzingen kan geven voor de aanwezigheid van vegetatie. Wel rijst de vraag of de voorkeur moet worden gegeven aan de 'objectieve' kartering die door de beeldverwerking tot stand komt en die in de betreffende pixels kennelijk dominantie van kale bodem aantreft, dan wel aan de 'subjectieve' visie van de gebiedsdeskundigen (die het overigens met elkaar eens zijn).

### 4.2.2 Effecten van geometrische onnauwkeurigheid.

Bij nadere beschouwing van de resultaatbeelden treedt ook een ander opvallend verschijnsel op in de overgangszone tussen binnen- en buitendijks gebied. Aan de dijkzijde van een aantal door dijken begrensde schorren is aan de oostzijde soms een strook vegetatie gekarteerd, waar die niet voorkomt, althans niet buitendijks. Dit is een gevolg van de bij de beeldverwerking gevolgde procedure; het geometrisch gecorrigeerde satellietbeeld en de dijkencoverage passen niet perfect op elkaar. In het geometrisch gecorrigeerde beeld is een fout van 1 pixel (30 meter) niet ondenkbaar, terwijl ook in de dijkencoverage onnauwkeurigheid kan optreden. In dit geval lijkt er een systematische afwijking op te treden tussen de geometrie van het satellietbeeld en die van de dijkencoverage; de informatie van de dijkencoverage 'verplaatst' de dijken enigszins in oostelijke richting ten opzichte van het remote sensing beeld; in de tussenliggende strook van 1 à 2 pixels breedte wordt door de beeldverwerking vegetatie (gras) gekarteerd.

### 4.2.3 Betrouwbaarheid van het slib-percentage-algoritme

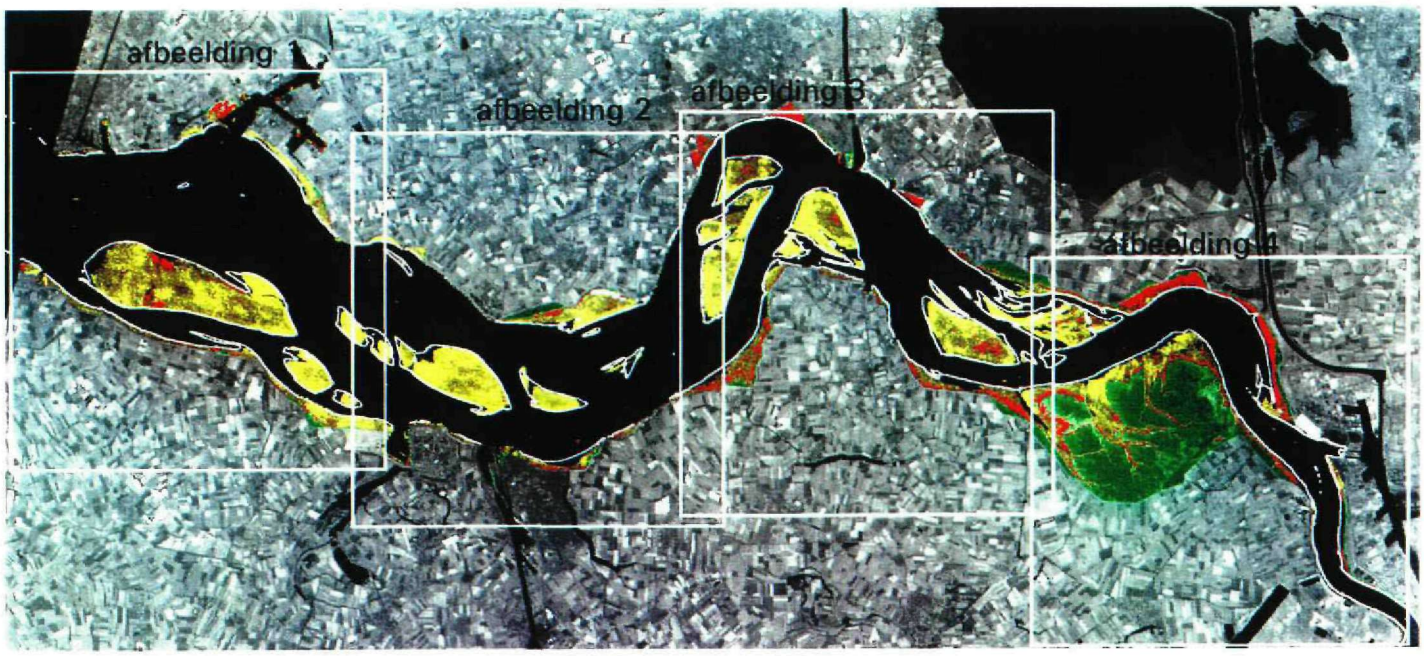
Het algoritme dat digitale beeld-informatie omzet in een schatting van het slib-percentage is geconstrueerd op basis van koppeling van bodembemonsterings-resultaten en digitale informatie.
Vanwege het relatief grote formaat van een pixel, kan de spectrale informatie van een pixel niet met zekerheid beschouwd worden als zijnde representatief voor de bijbehorende bodembemonsterings-gegevens; binnen het oppervlak van een pixel kan variatie in sedimentsamenstelling optreden.
Door de wijze van bemonsteren en op grond van de daarbij gevonden slib-percentages mag verwacht worden dat:
1. het algoritme zal tenderen naar overschatting van het slibpercentage,
2. de onnauwkeurigheid van de slib-percentage-schattingen zullen toenemen bij extrapolatie naar hogere slibpercentages.
Verificatie van de resultaten aan de hand van een vergelijking met McLaren bemonsterings-gegevens zal hierover meer duidelijkheid verschaffen.

### 4.2.4 Robuustheid van het slib-percentage-algoritme

Het algoritme, dat voor de Plaat van Walsoorden opgesteld is, is hier toegepast op het gehele Westerschelde-gebied. Niet geverifiëerd is of inderdaad het inderdaad gegeneraliseerd kan worden voor toepassing op een groot gebied. Twee belangrijke aspecten van kartering met satellietdata zijn hieraan verbonden. Enerzijds is het algoritme gevoelig voor het vochtgehalte van het sediment en kan tevens tot misclassificatie leiden wanneer het sediment bedekt is met een laagje water. Het getijde heeft daarop een grote invloed. De satelliet-opname karakteriseert het gehele gebied op één moment. Het gemiddeld tijdsverschil van laagwater tussen Vlissingen en Antwerpen (Prosperpolder) bedraagt 1.47 uur; daaruit moge duidelijk zijn dat er van west naar oost aanmerkelijke verschillen kunnen optreden met betrekking tot de tijdsperiode na droogvallen van sediment van hetzelfde type en met een overeenkomstige ligging t.o.v. NAP. 'Kleurverschillen', op deze wijze geintroduceerd, kunnen niet door het huidige algoritme worden geïnterpreteerd.
Daarnaast kunnen er ruimtelijke verschillen optreden in samenstelling van de atmosfeer boven het gebied met (wederom) kleurverschuivingen als gevolg, welke niet door het algoritme worden ondervangen. Ook hier zijn mogelijke verfijningen van het algoritme denkbaar.

### 4.2.5 Stabiliteit van het slib-percentage-algoritme

Het gebruikte algoritme is opgesteld op basis van de digitale informatie in het satellietbeeld. Er is geen correctie toegepast voor atmosferische effecten (verstrooiing en absorptie). Omdat de atmosferische omstandigheden ook grote temporele variaties vertonen is het algoritme in principe slechts geldig voor het Landsat TM beeld van 7 september 1993. In die zin is het algoritme niet stabiel; het algoritme kan slechts met aanpassingen (in de coëfficiënten) op een ander beeld worden toegepast. Indien men Landsat TM beelden voor monitoring doeleinden wil gebruiken is een betere optie de beelden eerst atmosferisch te corrigeren en het algoritme op basis van het gecorrigeerde beeld te bepalen. Het is dan in principe mogelijk om een stabiel algoritme op te stellen door combinatie van spectrale remote sensing informatie en adequate bodembemonsteringsgegevens.

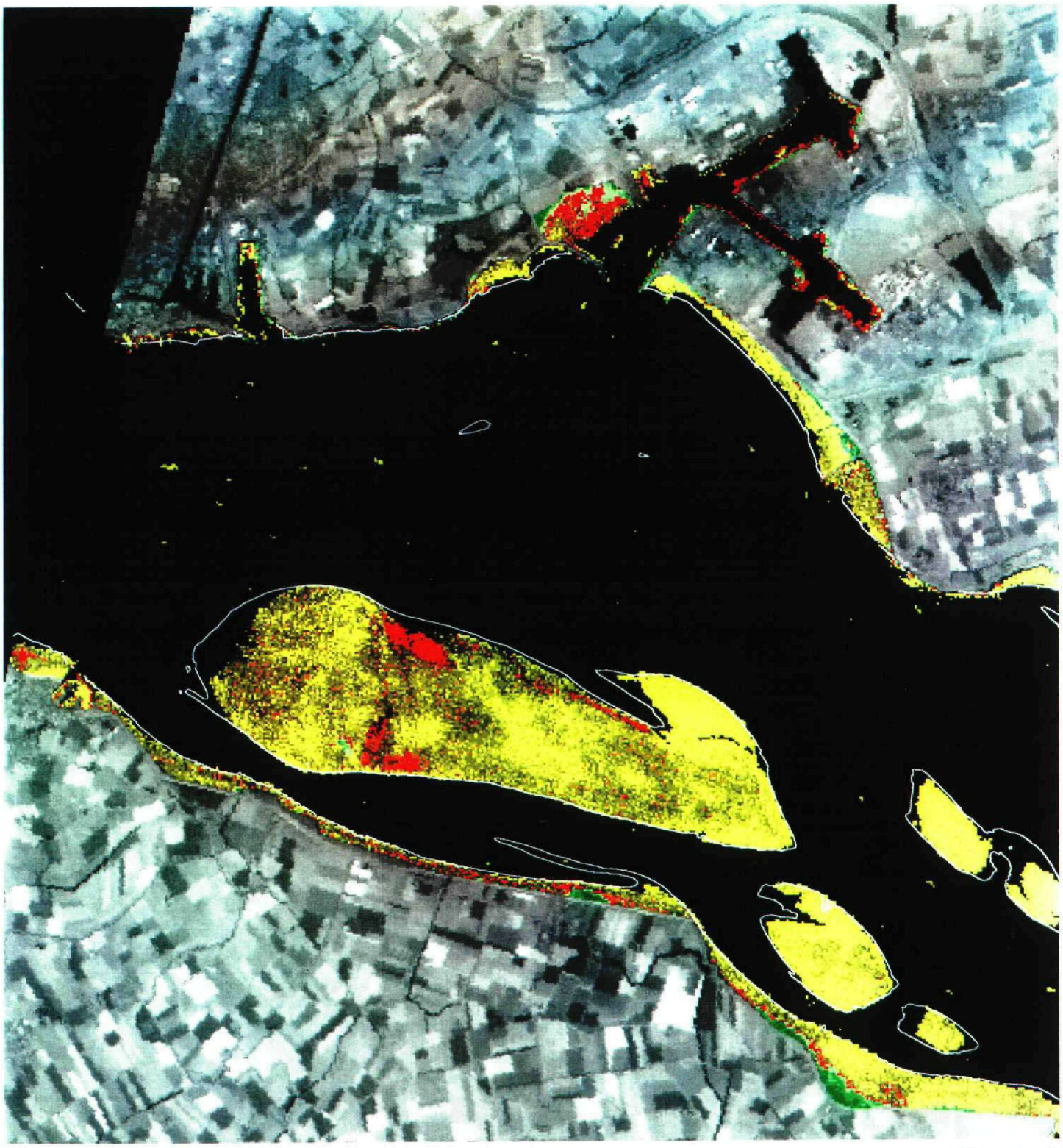



Slibkartering Westerschelde
Landsat TM
Opnamedatum 7 september 1993

Dieptelijn 1992
Witte lijn : NAP - 2.5 m

| Kleipercentage | Vegetatie index |
|---|---|
| 0 - 10 % slib | laag |
| 11 - 20 % slib | |
| 21 - 30 % slib | |
| 31 - 40 % slib | |
| 41 - 50 % slib | |
| > 51 % slib | hoog |

Meetkundige Diens
RIKZ
Rijkswaterstaat



afbeelding 1

Kleipercentage

- 0 - 10 % slib
- 11 - 20 % slib
- 21 - 30 % slib
- 31 - 40 % slib
- 41 - 50 % slib
- > 51 % slib

Vegetatie index

- laag
- hoog

Schaal 1 : 75000

2 0 2 Kilometers

Meetkundige Dienst
RIKZ
Rijkswaterstaat

afbeelding 2

Kleipercentage

- 0 - 10 % slib
- 11 - 20 % slib
- 21 - 30 % slib
- 31 - 40 % slib
- 41 - 50 % slib
- > 51 % slib

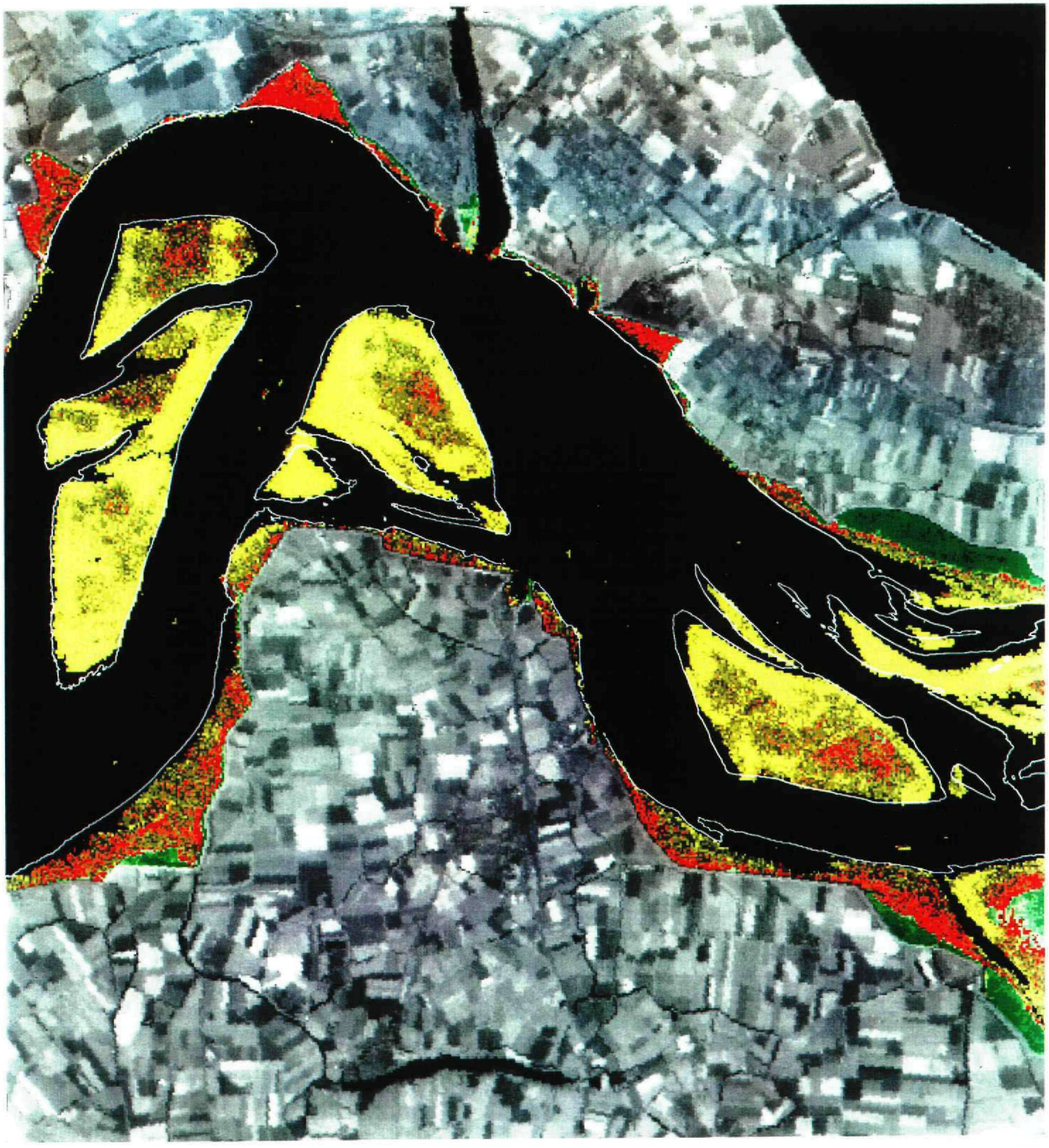
Vegetatie index

- laag
- hoog

Schaal 1 : 75000

2 0 2 Kilometers

Meetkundige Dienst
RIKZ
Rijkswaterstaat



afbeelding

Kleipercentage

- 0 - 10 % slib
- 11 - 20 % slib
- 21 - 30 % slib
- 31 - 40 % slib
- 41 - 50 % slib
- > 51 % slib

Vegetatie index

- laag
- hoog

Schaal 1 : 75000

2 0 2 Kilometers

Meetkundige Dier
RIKZ
Rijkswaterstaat

afbeelding

Kleipercentage

- 0 - 10 % slib
- 11 - 20 % slib
- 21 - 30 % slib
- 31 - 40 % slib
- 41 - 50 % slib
- > 51 % slib

Vegetatie index

laag

hoog

Schaal 1 : 75000

2 0 2 Kilometers

Meetkundige Dien:
RIKZ
Rijkswaterstaat

## 5. Blik op de toekomst

### 5.1 Verificatie en verdere ontwikkeling van de methode

Hieronder volgen kort enkele suggesties/plannen voor verificatie en verdere ontwikkeling en gebruik van slib-percentage-kartering.

Allereerst is verificatie geboden van het nu gebruikte algoritme. Aspecten daarvan zijn:

1 - Hoe nauwkeurig is het slibgehalte te kwantificeren?
2 - In welke mate is generalisatie van het algoritme, opgesteld voor slibpercentage kartering van de Plaat van Walsoorden, correct? Ofwel, is het algoritme in ruimtelijke zin robuust?
3 - Is het mogelijk het algoritme (of een aanpassing daarvan) toe te passen op Landsat TM gegevens van een andere datum? Ofwel is het algoritme in temporele zin robuust en stabiel?
4 - Is verdere generalisatie van de methode mogelijk zodat deze toepasbaar is voor Landsat beelden van andere gebieden?

ad 1,2 - Toetsing van de nauwkeurigheid en verificatie van de ruimtelijke robuustheid van de methode kan geschieden via vergelijking met de McLaren bemonsteringsresultaten van 1992 en 1993.

ad 3,4 - Toetsing van de stabiliteit c.q. ontwikkeling van een stabiel algoritme zou kunnen worden bereikt door toepassing van het algoritme (of aanpassingen daarvan) op satellietbeelden van verschillende data (jaren).
De beste strategie voor ontwikkeling van een stabiel algoritme is om in eerste instantie atmosferische correctie toe te passen. Na deze correctie voor zowel in tijd als in ruimte variabele verstrooiing en absorptie in de atmosfeer, bevatten de data nog slechts informatie over de bodem. Een slib-percentage-algoritme, gebaseerd op atmosferisch gecorrigeerde remote sensing data is in principe toepasbaar op elk geschikt Landsat-beeld van het Westerschelde-gebied.
Toepassing van de methode op Landsat beelden van andere gebieden is dan in principe ook mogelijk. Daarbij zij opgemerkt, dat een ruimere in situ trainingsset met daarin met name zeer slibrijke bemonsteringsgegevens de betrouwbaarheid en ruime toepasbaarheid van het slib-percentage-algoritme zou verbeteren.

Met betrekking tot de beeldverwerking is een verbetering en verfijning denkbaar met betrekking tot de scheiding kale bodem - vegetatie; (met inbreng van gebiedsdeskundigen en gecombineerd gebruik van NDVI-informatie en uit TM band 4 kan deze scheiding wellicht worden aangescherpt).

### 5.2 Monitoring

Slibrijke gebieden in het intergetijdegebied zijn van groot ecologisch belang. Door de stabiliteit van de bodem en de aanwezigheid van organisch materiaal kunnen bodemdieren hier relatief grote dichtheden bereiken. Deze bodemdieren zijn op hun beurt prooi voor steltlopers en (plat)vissen.
De voorgenomen verdieping van de Westerschelde en de daarmee samenhangende wijzigingen in het stortbeleid zullen effecten hebben op erosie en sedimentatie in het gebied en daarmee op ligging en hoogte van platen.
Bij gebleken robuustheid en stabiliteit van het slib-percentage-algoritme is het mogelijk de omvang en ligging van slibrijke en minder slibrijke gebieden in de tijd te volgen. Monitoring van de slibvoorkomens in de Westerschelde kan van groot belang zijn voor het in kaart brengen van de effecten van deze verdieping en de hier gedemonstreerde techniek kan daartoe een bijdrage leveren.

In retrospectieve zin is er de mogelijkheid om tot 1984 'terug te kijken' aan de hand van Landsat TM opnamen, die bij laagwater en gunstige atmosferische omstandigheden zijn gemaakt.

## 5.3 Enkele overwegingen

- Aan karteringen van dit type met Landsat TM beeldmateriaal kleven ook een aantal nadelen, die in de voorgaande tekst al genoemd zijn. De Landsat satelliet heeft een vaste overkomstfrequentie van 1 maal per 16 dagen over hetzelfde gebied. Samenvallen van overkomst van de satelliet met een laagwater situatie ter plekke komt slechts een betrekkelijk gering aantal keren per jaar voor. Een garantie voor het beschikbaar komen van zelfs maar een beeld, dat is bij onbewolkte omstandigheden en bij laag water is geregistreerd boven een bepaald gebied, valt niet te geven. Niet alleen vanwege de gebondenheid aan het tijdstip van overkomst van de satelliet, maar ook omdat de getijdesituatie varieert over het beeld, is het onmogelijk om alle lokaties onder de optimale getijdesituatie te registreren. Verder kan het ruimtelijk detail van de Thematic Mapper sensor met zijn pixels van 30x30 $m^2$ een beperking vormen. Wanneer men een gedetaileerde slibkaart van een klein gebied zou willen maken kan het gebruik van een vliegtuig remote sensing instrument voordelen bieden. Men kan bij gebruikmaking van een vliegtuig remote sensor het tijdstip van opname zo kiezen dat het (zo goed mogelijk) samenvalt met laagwater in het op te nemen gebied, tijdstip van opname en veldbemonsteringsactiviteiten kunnen optimaal op elkaar worden afgestemd, men kan een bij de karteringsdoelstelling passend pixelformaat instellen, en heeft in veel gevallen de beschikking over een grotere hoeveelheid spectrale kanalen met een verhoogd onderscheidingsvermogen ten opzichte van de TM-sensor. Voorwaarden zijn dat een operationele vliegtuig remote sensor beschikbaar is in Nederland.

- Het onderzoeken van de mogelijke toepasbaarheid van video remote sensing technieken voor slibkartering is zeker de moeite waard. Optische video is met betrekking tot spectraal onderscheidend vermogen min of meer vergelijkbaar met de Thematic Mapper sensor van Landsat, maar biedt verder de voordelen (en nadelen!) van vliegtuig remote sensing.

- Een belangrijk integraal produkt zoals een ecotopenkaart kan worden gemaakt door de kaart met slibvoorkomens en vegetatiebedekking te combineren met voldoende gedetailleerde hoogtegegevens van het gebied.

## 6. Referenties

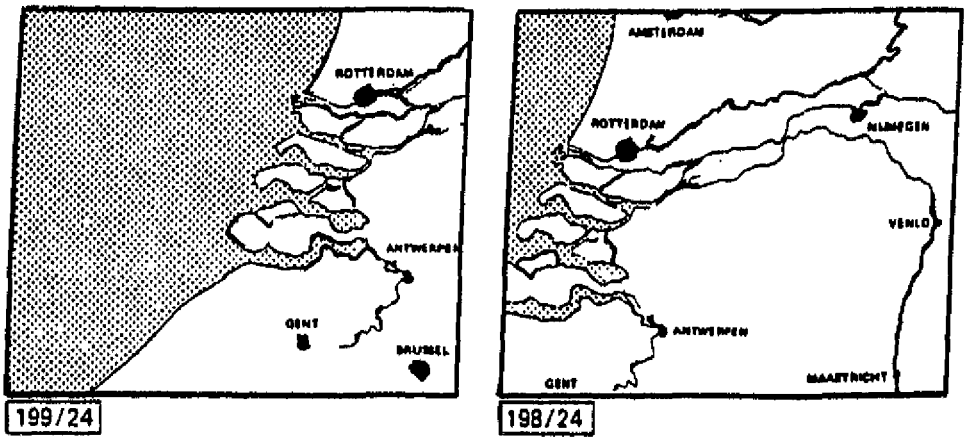
Buiten, H.J. en J.G.P.W. Clevers (redaktie), 1990, Remote Sensing, theorie en toepassingen aardobservatie, Pudoc, Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen

Kokke, J.M.M., 1994, Mapping of sediment distribution in intertidal areas with optical remote sensing, BCRS-rapport NRSP-2 95-14.

Storm, C., D.C. van Maldegem, H.J. den Hollander, J.M.M. Kokke, 1995, LANDSAT atlas Schelde estuarium (Een selectie van satellietbeelden vanaf de Voordelta tot aan Antwerpen), Werkdocument RIKZ OS-95.802X, Rapport MD-GAT 95-21.

**Bijlage 1: Aanvullende informatie over de Landsat Thematic Mapper sensor**

De Landsat-satelliet volgt een polaire, zgn. zon-synchrone baan (passeert een bepaalde plaats op aarde altijd op hetzelfde tijdstip). De Thematic Mapper roteert heen en weer dwars op de vliegrichting, daarbij beeldelementen registrerend van 30x30 $m^2$ in zeven brede spectrale banden (in het blauwe, groene rode deel van het zichtbare spectrum, het nabijinfrarood, het midden-infrarood (2 banden) en het thermisch infrarood). De satelliet passeert Nederland van noord naar zuid en registreert daarbij eenmaal per 16 dagen dezelfde strook van $\pm$180 km breedte in alle zeven banden. De stroken overlappen enigszins, zodat bepaalde gebieden met een dubbele frequentie in kaart worden gebracht. Dit laatste geldt ook voor een groot deel van het Zeeuwse intergetijdegebied (zie onderstaande figuur) en verhoogt uiteraard de kans op een onbewolkte opname.




Figuur 3: Landsat scenes van het Zeeuwse intergetijdegebied.
opnamefrekwentie voor elke scene 1x per 16 dagen

Mits niet gehinderd door bewolking registreert de TM sensor vrijwel gelijktijdig spectrale informatie van een groot gebied en verschaft derhalve een compleet ruimtelijk beeld van de toestand aan het oppervlak.
De kosten voor een zgn. TM-scene, welke een oppervlak van 180x180 $km^2$ beslaan, bedragen $\pm$ fl 7400,-. Voor een toepassing, zoals in dit project beoogd, is het ruimtelijk detail (pixels van 30x30 $m^2$) voldoende. Ook het spectrale onderscheidingsvermogen van de sensor is in principe toereikend om het gewenste onderscheid tussen water, kale bodem en vegetatie aan te brengen en een classificatie op de kale delen en in de vegetatie aan te brengen.

**Bijlage 2: Waterstands-informatie 7 september 1993.**

Tabel 1: Getijde-informatie 7 september 1993

| STATION | LAAGWATER | NAP -cm | Schatting NAP -cm 11.10 MET |
|---|---|---|---|
| VLISSINGEN | 12.16 | 160 | 145 |
| TERNEUZEN | 12.46 | 171 | 110 |
| HANSWEERT | 13.08 | 184 | 100 |
| BATH | 13.46 | 191 | 95 |