

7526



GRONDMECHANICA
DELFT

DETECTIE GEULEN ONDER
STEENZETTING MET GRONDRADAR
(EINDRAPPORT)
VERGELIJKING
RADARINTERPRETATIE MET
WAARGENOMEN GEULENPATROON

Stieltjesweg 2
Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon 015-693500
Telex 38234 soil nl
Telefax 015-610821

Postgiro 234342
Bank Mees en Hope NV
Reknr. 25.92.35.911
K.v.K. S 145040 Delft



DETECTIE GEULEN ONDER STEENZETTING
MET GRONDRADAR

VERGELIJKING RADARINTERPRETATIE
MET WAARGENOMEN GEULENPATROON

EINDRAPPORT

CO-293660/31
mei 1990
dFe/West/2/radar

Opgesteld in opdracht van:
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde
DELFT

AFDELING GEOFYSICA
projectleider: ir. J.W. de Feijter
projectbegeleider: dr. J.K. van Deen
afdelingshoofd: dr. J.K. van Deen

INHOUD:	blz.:
SAMENVATTING	1
1. INLEIDING	2
2. UITVOERING METINGEN EN INTERPRETATIE	4
2.1 De metingen	4
2.2 De interpretatie	5
2.2.1 Slag 1 (Bijlage A)	5
2.2.2 Slag 2 (Bijlage B)	5
2.2.3 Slag 3 (Bijlage C)	5
2.2.4 Slag 4/5	6
2.2.5 Slag 6 (Bijlage D)	7
2.2.6 Slag 7	7
2.2.7 Slag 8 (Bijlage E en F)	8
3. RESULTATEN	9
3.1 Slag 1	9
3.2 Slag 2	9
3.3 Slag 3	9
3.4 Slag 4/5	10
3.5 Slag 6	10
3.6 Slag 7	11
3.7 Slag 8	12
4 HET GEULENPATROON EN DE RADARINTERPRETATIE	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Detailbeschrijving steenclusters	14
4.2.1 Stenencluster I: linker geulenpatroon	14
4.2.2 Stenencluster II: middelste geulenpatroon	15
4.2.3 Stenencluster III: rechter geulenpatroon	16
4.3 Kwantitatieve vergelijking interpretatieslagen	18
5. CONCLUSIES	21
6. AANBEVELINGEN	24

bladnummer : - 2 -
ons kenmerk: CO-293660/31
datum : mei 1990

BIJLAGEN:

- A. Facsimile weergave van interpretatie op de dag van uitvoering (slag 1).
- B. Interpretatie radardata na slag 2
- C. Interpretatie radardata na verwijdering van achtergrondsignaal (slag 3)
- D1 - 3. Geulenpatroon uit meest gedetailleerde grondradarinterpretatie zonder informatie van werkelijke situatie (slag 6)
- E1 - 3. Waargenomen geulenpatroon onder steenclusters I, II en III.
- F1 - 3. Geulenpatroon uit grondradarinterpretatie met informatie van werkelijke situatie (slag 8)

SAMENVATTING

Op een dijkvak van de Westerschelde in Zeeuws-Vlaanderen is een grondradaronderzoek verricht om de mogelijkheden na te gaan van het detecteren van erosiegeulen onder een steenzetting van betonblokken met een afmeting van $0,5 * 0,5 * 0,2 \text{ m}^3$. Het doel van dit onderzoek is tweeledig.

1. Kan met grondradar globaal de aanwezigheid van geulen en de uitgestrektheid ervan aangetoond worden ?
2. Kan de voortschrijding van een geulontwikkeling met voldoende nauwkeurigheid in de tijd worden gevolgd opdat in combinatie met modelvorming omtrent het erosieverschijnsel een predictie gemaakt kan worden over het moment waarop de erosie fataal wordt voor de waterkerende constructie ?

Na de radarmetingen zijn door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde in afwezigheid van Grondmechanica Delft 13, deels door Grondmechanica Delft aangewezen, blokken gelicht om drie geulpatronen in kaart te brengen.

Op een aantal verschillende wijzen zijn de radardata bewerkt en geïnterpreteerd. Dit heeft geleid tot een aantal interimrapporteringen. Na deze interpretatieronden is het opgemeten geulenpatroon naast de radarinterpretaties gelegd. Tenslotte is nog een 'optimale' interpretatie van de radardata gemaakt.

De conclusies uit het onderzoek zijn positief. De radarwaarnemingen komen goed overeen met de gevonden geulen. Het inspecteren van een steenzetting op de aanwezigheid van geulen onder de zetting op routinematige wijze is goed mogelijk maar op de huidige wijze tamelijk tijdrovend. In verband met de efficiëntie van de uitvoering en de interpretatie van de metingen dienen nog enkele ontwikkelingen uitgevoerd te worden. Het nauwkeurig volgen van de ontwikkeling van een geulpatroon was met de beschikbare interpretatiegereedschappen niet mogelijk. Dit betekent dat de voortschrijding van de erosie groot moet zijn alvorens er met de radar een significant verschil waarneembaar is. In het kader van de tweede vraagstelling moet worden opgemerkt dat het inzicht ontbreekt welke uitgestrektheid van erosiegeulen een potentieel gevaar oplevert voor de waterkering. Voor de veiligheidsbeoordeling is dat inzicht, naast de meetgegevens van de uitgestrektheid, uiteraard van belang.

*inzicht
waar*

1. INLEIDING

Aan de steenzetting op de Westerscheldedijk bij Walsoorden is grondradaronderzoek verricht met het oog op de vaststelling van erosiegaten onder deze steenzetting.

De vraagstelling van dit onderzoek is tweeledig:

1. kunnen met grondradar geulen onder een steenzetting worden aangetoond, zodat de dijkbeheerder geïnformeerd wordt waar een belangrijke holle ruimte onder de steenzetting zich ontwikkeld heeft?
2. Kan met grondradar een geulenpatroon onder een steenzetting op een dusdanige wijze in kaart worden gebracht dat in de loop der tijd een uitbreiding en/of een verdieping en/of een verplaatsing gevolgd kan worden, zodat inzicht verkregen wordt in het vormingsproces en de vormingssnelheid van het geulenpatroon? Aan deze tweede doelstelling is gekoppeld het ontwikkelen van een erosiemodel zodat aan de hand van een radaronderzoek en dit model kan worden vastgesteld op welke termijn de erosie bedreigend wordt voor de waterkerende constructie; de beheerder kan daarmee het onderhoud goed plannen en weet wat hij op de diverse locaties kan verwachten.

Deze beide doelstellingen lopen tijdens het onderzoek door elkaar. In de slotconclusies van het totale project worden de resultaten van het radaronderzoek geëvalueerd volgens deze beide doelstellingen.

Na de metingen aan de steenzetting is een aantal interpretatieslagen uitgevoerd. Tijdens dit interpretatieproces zijn binnen Grondmechanica Delft ontwikkelde interpretatiegereedschappen gebruikt voor de interpretatie van de meetgegevens. Deze interpretaties zijn tussentijds gerapporteerd in de rapporten:

- Grondradargeulendetectie onder steenzetting Hulster Ambacht CO-293660/16, mei 1988
- Interpretatie grondradardata voor geulen detectie onder steenzetting CO-293660/25, april 1989.

In het eerstgenoemde rapport CO 293660/16 is tevens de wijze van uitvoering van de metingen beschreven. Naast de in de interimrapporten behandelde interpretatieronden is er nog een interpretatie geweest, welke per brief gerapporteerd is (juni 1989). Het volgende hoofdstuk schenkt hieraan enige aandacht.

Na de radarmetingen zijn uit de steenzetting dertien stenen gelicht. De grond onder deze stenen is gefotografeerd en de geulvorming is in kaart gebracht. De gegevens zijn gerapporteerd in het RWS-DWW-rapport: Onderzoek geulendetectie, deel geulenpatroon, WBO-R-89.053, augustus 1989.

De opgraafgegevens zijn pas ter beschikking gesteld na de voorlaatste interpretatie (slag 7) (zie hoofdstuk 2).

Het onderhavige rapport is het eindrapport van het gehele onderzoek. Aan de orde komen de vergelijkingen van de verschillende interpretatieslagen met de opgraafgegevens, alsmede de eindconclusies van het gehele project. Opgemerkt moet worden dat de metingen indertijd uitgevoerd zijn met het 'kale' GSSI-grondradarsysteem zonder de huidige GD-dataprocessingsystemen GRAS en GRIS. Pas in een later stadium zijn de data gedigitaliseerd op GRAS opslagen. In de loop van het interpretatieproces kwamen in het kader van projecten voor derden en van het eigen speurwerk van Grondmechanica Delft steeds meer hardware- en software-gereedschappen beschikbaar. Bij elke interpretatie is steeds de dan meest geavanceerde techniek toegepast, voor een steeds intensievere bewerking van de meetgegevens. Deze meetgegevens waren steeds dezelfde 'oude' gegevens, waarvan door de indertijd gebruikelijke wijze van opnemen echter het dynamisch bereik gering was; door de voortgezette dataprocessing was dat basisgegeven uiteraard niet te corrigeren.

2. UITVOERING METINGEN EN INTERPRETATIE

2.1 De metingen

Voorafgaande aan de metingen was een proefvak uitgezet. De steenzetting bestaat uit 10 rijen betonblokken van 50 x 50 cm, die in een halfsteensverband liggen (zie Bijlage B). Het proefvak besloeg een gebied van 9 bij 3 meter aan onderzijde van de steenzetting en bestond daarmee uit 6 rijen van 18 á 19 stenen.

Het proefvak is intensief bemeten: 6 langsraaien over het midden van de blokken, onderlinge afstand 0,5 meter en: 18 dwarsraaien gestart op het midden van de blokken uit de onderste rij; de onderlinge raaiafstand bedraagt ook 0,5 meter.

Daarnaast is er nog extra informatie ingewonnen door de onderste twee langsraaien verder door te trekken (50 á 100 meter); deze data zijn in dit kader niet bewerkt en geïnterpreteerd.

Er zijn twee typen antennes gebruikt: 300 MHz en 900 MHz. De proefmetingen toonden aan dat de 900 MHz antenne veel beter geschikt was dan de 300 MHz antenne: de pulsvorm van de 300 MHz antenne is zo lang dat de reflectie van de onderzijde van de blokken overstraald wordt door de staart van de zendpuls. Het verdere onderzoek is daarom gedaan met de 900 MHz antenne.

Om de antenne goed te kunnen geleiden zijn pinnen tussen de blokken aangebracht, waartegenaan een geleidingsgoot gelegd kan worden. Bij de uitvoering wordt de 900 MHz antenne met behulp van een liertje met constante snelheid voortgetrokken door de goot, waarbij iedere 0,5 meter een marker gegeven wordt. De effectieve meetlengte van de goot is circa 2,7 meter. Bij het meten van de langsraaien wordt de goot na de radarmeting 2,5 meter opgeschoven. Zo ontstaat een aaneengesloten lengteprofiel van 10 meter. Op deze wijze zijn de 6 langsraaien nauwkeurig bemeten.

Bij de opnames voor het dwarsprofiel wordt de goot dwars op de glooiing gelegd; de lier bevindt zich bovenaan; de antenne staat iets boven het midden van de eerste blokkenrij, omdat het Scheldewater tijdens deze metingen vrij hoog stond. Er wordt op deze wijze 2,75 meter van de 3 meter steenzetting gescand. Na iedere meting wordt de antenne weer in de beginstand gebracht en wordt de goot met antenne en lier 0,5 meter verlegd.

De metingen zijn verricht met de standaard grondradarapparatuur, waarbij de data analoog zijn geregistreerd met de taperecorder. De eerste interpretatieslag is uitgevoerd op deze data die op de grafische recorder zijn weergegeven. Voor de latere interpretatieslagen zijn de opgeslagen data alsnog op het inmiddels beschikbaar gekomen digitale GRAS-systeem overgezet.

2.2 De interpretatie

De volgende interpretatieslagen zijn te onderkennen in de loop van het project.

2.2.1 Slag 1 (Bijlage A)

De eerste interpretatie is uitgevoerd op de dag van de metingen. Deze bestaat uit een eerste globale beoordeling, direct aansluitend aan de metingen. De beoordeling vond plaats op basis van een uitdraai die het resultaat was van de instellingen van de verwerkingsapparatuur die tijdens de metingen waren ingesteld. Doel van de interpretatie was het aangeven van een aantal (5 á 10) stenen die ten behoeve van de kwantitatieve interpretatie gelicht zouden moeten worden.

Merk overigens op dat in bijlage A het patroon van de stenen onjuist is weergegeven: de rijen A,B,... zijn in werkelijkheid ten opzichte van elkaar in een halfsteens verband gezet !

2.2.2 Slag 2 (Bijlage B)

De tweede interpretatie is gedaan met behulp van het grondradar acquisitiesysteem GRAS. Hiertoe zijn de meetgegevens die op de analoge tape staan overgebracht op GRAS, zodat de data in digitale vorm beschikbaar zijn.

Op deze data zijn een aantal bewerkingen losgelaten om een datapresentatie te verkrijgen die eenvoudig te interpreteren is, d.w.z. dat een weinig geoefend oog de interpretatie kan doen.

De normale intensiteitsweergave (zwart = groot signaal, wit = klein signaal) is hier vervangen door een presentatie met intensiteits"banden" waardoor in het echogram een betere indruk verkregen wordt van de amplitude van het reflectiesignaal.

2.2.3 Slag 3 (Bijlage C)

Door het digitaal beschikbaar hebben van de radardata kunnen bepaalde bewerkingen uitgevoerd worden. Een van die bewerkingen is het onderling aftrekken van reflectiepulsen (wiggle traces). Onder 'reflectiepuls' verstaan we het amplitude-tijd signaal dat opgevangen wordt met de ontvangstantenne. Tijdens het meten worden circa 6 reflectiepulsen per seconde ingewonnen. Door reflectiepulsen van elkaar af te trekken blijft het verschil tussen twee reflectiepulsen over: alle vaste patronen in de reflectie zoals de constante dikte van de stenen, multiples, zendpuls, en dergelijke, verdwijnen dan. In het verschil blijven alleen onderlinge verschillen over.

Voor de horizontale meettraaien is als signaal dat afgetrokken wordt, het gemiddelde genomen van alle reflectiepulsen uit de betreffende meettraai. Door het aftrekken van alle reflectiepulsen met deze gemiddelde reflectiepuls ontstaat een nieuw radarechogram, dat na versterking afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde signaal weergeeft.

Voor de interpretatie is vooral de zone bestudeerd die direct onder de onderkant van de stenen zit; hier bevinden zich namelijk de aanzetten van de geulen. Door het aftrekken is de "overstraling" van de reflectie van de onderkant van de stenen verdwenen, zodat deze zone nu goed bekeken kan worden.

Voor de verticale raaien is de situatie gecompliceerder omdat te verwachten is dat er een verschil in vochtgehalte van de ondergrond is tussen begin (onderaan) en eind (bovenaan talud) van de raai. Per verticale meetraai zijn dan ook twee aftrekbewerkingen gedaan: één waarbij het gemiddelde van de onderste stenen is afgetrokken van alle reflectiepulsen uit die raai en één waarbij hetzelfde met het gemiddelde van de bovenste stenen is gedaan. Afhankelijk van de positie van de te bestuderen steen is bij de interpretatie gebruik gemaakt van één van beide nieuwe radarechogrammen en soms van beide.

2.2.4 Slag 4/5

Bij deze ronden zijn geen nieuwe bewerkingen op de data gedaan, maar is een nadere analyse gemaakt van de interpretatie van slag 3. In het kader van de onderhavige rapportage worden 4 en 5 als één slag beschouwd. Het doel van de interpretatieronde is onder andere om vast te stellen van welke "stenen" er geulinformatie gewenst is als calibratie voor de definitieve interpretatie.

Een goede referentiesteen dient in twee richtingen over het midden van de steen gescand te zijn zodat verstoringen van de randen (naden tussen de stenen) op de reflectie in beide richtingen dezelfde en gering zijn. Hierdoor vervalt de helft van de stenen. Stenen welke in aanmerking komen liggen op de eerste (onderste), de derde en de vijfde rij (A,C, en E).

Stenen, welke in twee richtingen gaten aangeven of in beide richtingen geen gaten, vertonen een consistent beeld. Als criterium is daarbij aangehouden dat 'ergens' in de horizontale en verticale scan iets gedetecteerd wordt; mogelijk niet aansluitend. Het lichten van dergelijke stenen heeft weinig nut om de interpretatie begrijpelijker te maken. Wel dient in een later stadium uiteraard bekeken te worden of de interpretatie in overeenstemming is met de werkelijkheid.

Interessante blokken zijn die blokken, waarbij in beide richtingen iets verschillends gemeten wordt: horizontale scan geeft wel een gat en de verticale scan niet of andersom.

Als de horizontale scan wel een gat geeft en de verticale niet, is dat verklaarbaar. Ervan uitgaande dat het geulenpatroon vooral verticaal georiënteerd is, is het denkbaar dat de verticale scan min of meer parallel aan de geulrichting en op enige afstand van de geul uitgevoerd is; hierdoor zou de geul niet als zodanig herkend kunnen worden bij de interpretatie.

De omgekeerde situatie is slecht verklaarbaar: een steen die wel in verticale richting een gat vertoont en niet in horizontale richting (ervan uitgaande dat een geul niet horizontaal loopt). Zo'n steen moet extra inzicht kunnen verschaffen voor de interpretatie en is daarom geschikt als referentiesteen.

2.2.5 Slag 6 (Bijlage D)

Na de interpretatieslag 4/5 is door de opdrachtgever de informatie vrijgegeven welke (13) stenen gelicht waren, zonder daarbij overigens de resultaten te melden. Geen van de naar aanleiding van slag 4/5 gevraagde stenen bleek daarbij te zijn. Besloten werd daarom te pogen een nog gedetailleerdere interpretatie te geven, maar nu beperkt tot de betreffende 13 stenen. Onder de stenen zijn twee categorieën te onderscheiden:

- stenen met meetraaien zowel horizontaal als verticaal over het midden van de steen
- stenen met de horizontale meetraai over het midden van de steen en met twee verticale meetraaien links en rechts van de steen.

Een van de problemen bij de interpretatie van de meetdata is het vaststellen van de diepte van de geul. In deze zesde slag is hier extra aandacht aan besteed.

Van iedere steen zijn 2 tot 6 reflectiepulsen apart uitgedraaid als amplitude-tijd grafiek; het aantal was afhankelijk van de variaties onder een steen: in elk geval altijd het midden van het gedeelte van de meetraai die over of langs de steen loopt. Het doel is om op deze wijze kwantitatieve gegevens over vorm en grootte van de geul(en) af te leiden.

De exercitie is uitgevoerd om het maximale uit de bestaande gegevens te halen met de beschikbare bewerkingstechnieken. Ten overvloede wordt nog eens opgemerkt dat de radardata nog zijn opgenomen met het oude GSSI-systeem, waarbij op het oorspronkelijk antennesignaal filtering en diverse versterkingen zijn toegepast; de oorspronkelijke reflectiepuls is uit deze metingen niet meer te reconstrueren. Het niet beschikbaar hebben van onbewerkte signalen blijkt een beperking te zijn voor de beoogde gedetailleerde kwantitatieve analyse waarin nu ook uitspraken worden verlangd over de diepte van de geul.

Bij het huidige GSSI-GRAS systeem wordt altijd het oorspronkelijke onbewerkte antennesignaal ingewonnen en digitaal opgeslagen; deze data worden dan achteraf versterkt, gefilterd, etc. Programmatuur is in ontwikkeling om reflectiepulsen automatisch te analyseren en om modelmatig reflecties te reconstrueren. Het heeft echter geen zin deze technieken toe te passen op niet-onvervormde meetdata, zoals de meetdata van Hulster-Ambacht.

2.2.6 Slag 7

Naar aanleiding van de interpretatie van slag 6 die volgens informatie van de opdrachtgever "veelbelovend" was, is nogmaals een interpretatie gegeven met enkele aannames ten aanzien van het ontstaansmechanisme van de geulen ("gedragsmodel") om na te gaan of dit een kwalitatief of kwantitatief betere interpretatie zou opleveren. De volgende aannames met betrekking tot ontstaan en vorming van de geulen zijn gemaakt.

- Geulen ontstaan op de verticale naden; in de radaropnamen blijken op die plekken vaak reflecties voor te komen die duiden op holle ruimten.
- De geulvorming vindt vooral plaats in verticale richting; de geulen verlopen geleidelijk.

Bij de interpretatie onder deze uitgangspunten zijn de radar-uitkomsten min of meer ondergeschikt gemaakt aan deze randvoorwaarden. Met name bij de verticale raaien is iedere geringe afwijking meegenomen als (verticale) geul; op basis van intensiteit en dergelijke zijn deze geringe afwijkingen niet meegenomen bij de vorige interpretaties. Door deze exercitie moest onder een aantal stenen een ander erosiepatroon aangenomen worden dan bij de vorige interpretatie was verkregen.

2.2.7 Slag 8 (Bijlagen E en F)

Na interpretatieslag 7 zijn uiteindelijk de fotografische en beschrijvingsgegevens van de 13 stenen vrijgegeven (Bijlage E 1-3). Een uitgebreide analyse is gemaakt van de overeenkomsten en verschillen tussen de interpretaties en de werkelijke gegevens. Op basis van de resultaten daarvan zijn de criteria waarop tot de interpretatie wel/geen geul besloten wordt nog aangescherpt. Deze aangescherpte criteria zijn tenslotte nog eens toegepast op de originele meetgegevens (bijlage F1-3).

3. RESULTATEN

3.1 Slag 1

De globale beoordeling op de dag van de metingen geeft aan dat er drie geulpatronen aanwezig zijn in het onderzochte proefvak.

In bijlage A is de schets opgenomen, zoals die na de veldmeting gemaakt is. Merk op dat de rijen in werkelijkheid steeds een halve steen verspringen en dus ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Er zijn een drietal geulpatronen zichtbaar, waarbij vooral het middelste patroon er in duidelijkheid uitspringt. Aan de hand van de eerste interpretatie is door Grondmechanica Delft aangegeven de volgende blokken te lichten: 64,45,27,29,9 en 11, en tevens aangegeven enkele blokken te lichten waar volgens de grondradarmetingen geen geul zou zijn.

3.2 Slag 2

In bijlage B is het resultaat van deze interpretatie weergegeven voor zowel de langs- als de dwarsraaien. De "geul" is weergegeven door een lijnstuk, waaromheen een gebied gearceerd is. Dit gebied geeft de invloedsfeer van de antenne weer. Uit de figuur blijkt dat de dwars- en langsraaien elkaar in het algemeen redelijk aanvullen. Ten opzichte van de eerste interpretatie zijn het linkse en het rechtse geulenpatroon veel duidelijker geworden. Bij de interpretatie is getracht zo objectief mogelijk te handelen, dat wil zeggen dat er niet gelet is op reeds geïnterpreteerde geulen; de dwarsraaien zijn geruime tijd na de langsraaien geïnterpreteerd. Direct rechts naast het proefvak is ook een geulenpatroon aanwezig; dit blijkt uit de langsraaien die iets voorbij het proefvak zijn doorgezet.

Opvallend is dat het aantal "geulen" bij de onderste blokkenrij veel geringer is dan onder de tweede blokkenrij. Dit zou erop kunnen wijzen dat het water dat in de geulen onder de blokken loopt uittreedt tussen de eerste en tweede rij blokken; dit kan te maken hebben met de overgang aan de onderzijde van het met betonblokken beklede gedeelte van het talud.

Een andere verklaring kan zijn dat de onderste rij zoveel schade heeft vertoond in het verleden dat er reeds herstel heeft plaatsgevonden.

3.3 Slag 3

Het resultaat van deze interpretatieronde is weergegeven in bijlage C, als horizontale en verticale streepjes ter plaatse van geïnterpreteerde geulen. Tevens is in de figuur aangegeven welke blokken naderhand door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde gelicht bleken te zijn (gearceerde blokken). Ten overvloede wordt er op gewezen dat ten tijde van deze interpretatie noch de plaats, noch de gegevens van de gelichte blokken bij Grondmechanica Delft bekend waren.

3.4 Slag 4/5

Het doel van deze slag was het selecteren van geschikte referentiestenen om aan de hand daarvan een scherper criterium voor de grondradar-data te formuleren. De gebruikte gegevens zijn die van slag 3.

Zoals in hoofdstuk 2 is beargumenteerd bevinden stenen die in aanmerking komen zich in de eerste, derde of vijfde rij (A, C of E). Rij E vertoont weinig geulen; deze rij ligt ver boven het gemiddeld hoog water. Gaten kunnen hier ook door landdieren (muizen, ratten, etc.) veroorzaakt worden. Het geulenpatroon lijkt in deze stenenrij te ontstaan. De rij is echter minder geschikt voor een goede referentiesteen, daar het aantal reflecties en de intensiteit daarvan veel geringer is dan van de daaronder gelegen rijen.

De eerste (onderste) rij A vertoont een ander gatenpatroon (veel minder gaten) dan de bovenliggende rijen. Het vermoeden bestond dat deze rij reeds gerestaureerd is geweest dan wel dat in deze rij minder erosie is opgetreden omdat door de constructie van de steenzetting weinig water kan uittreden tussen de stenen en ondergelegen zetting van basaltblokken.

Zo blijft over de derde rij C. In deze rij zijn de meeste stenen consistent, behalve blok nr. 54, en afgezien van de 'kleine' variaties bij de bovenrand van de rij. Bij de beoordeling moet overigens voor de positie van de verticale raaien een zekere tolerantie meegenomen worden, daar deze meetraaien vanwege het opkomende water en de golfslag soms iets hoger gestart zijn.

Als steen 54 niet gelicht is dan kan eventueel toch een steen uit rij E genomen worden (75, eventueel steen nr. 74). Steen 42 (rij C) kan ook interessante informatie opleveren daar weliswaar horizontaal en verticaal een geul wordt aangegeven, maar deze niet goed op elkaar aansluiten.

De overige stenen zullen weinig meerwaarde opleveren voor de interpretatie.

Stenen waaronder wel in horizontale richting en niet in verticale richting een gat is waargenomen bevinden zich in rij A. De stenen 9 en 15 komen voor nadere bestudering in aanmerking.

Uit de bovenstaande beschouwing volgt dat er weinig stenen zijn die een wezenlijke bijdrage kunnen leveren tot een betere interpretatie. De gewenste stenen moeten bovendien wel indertijd gelicht zijn.

De volgende stenen bleken gelicht te zijn: 27, 29, 40, 41, 59, 64, 68, 81, 84, 86 en 95.

3.5 Slag 6

Daar van de in slag 4/5 gewenste stenen geen enkele gelicht bleek te zijn, was de aanvankelijk gekozen onderzoekstrategie niet meer toepasbaar. Besloten werd daarom om op basis van de radargegevens van de 13 gelichte stenen per gelichte steen zo nauwkeurig mogelijk het geulenpatroon te schetsen. Dit resultaat wordt dan steen voor steen vergeleken met de beschrijving van de geulen in het veld.

De handmatige bewerkingen bleken zeer tijdrovend te zijn en kwantitatief weinig op te leveren. Voor een redelijk gedetailleerd geulenpatroon in de diepte dienen tientallen reflectiepulsens geanalyseerd te worden. Daarbij wordt onder één steen in wezen weinig gemeten: twee loodrecht op elkaar staande raaien. De radarantenne bekijkt daarbij een gebied met een zekere breedte. Overal uit dit gebied komen reflectiesignalen die op de ontvangstantenne vallen: de exacte positie van de reflector is echter niet bekend. Dit betekent dat het in kaart brengen van het "geulenpatroon" onder een steen moeilijk is. In de lengterichting van een raai kan iets meer over de positie gezegd worden daar de kortste afstand tot de reflector (bv. bodemgeul) in beeld komt op een bepaald punt van de meetraai; ergens in het vlak loodrecht op de richting van het meetraai en door dit punt ligt de bewuste reflectie. Uit zeer dicht op elkaar liggende parallelle meetraaien zou ook iets over de zijdelingse positie gezegd kunnen worden. Gelet op de achteraf gebleken afmetingen van de geulenpatronen is het gekozen meetnet van 0,5 meter te grof voor een nauwkeurige zijdelingse interpretatie.

De resultaten van de interpretatie per steen zijn weergegeven in bijlage D1-3. Op bijlage C is eerder al een overzicht gegeven welke stenen gelicht zijn.

Op bijlage D1-3 zijn de groepen bij elkaar horende stenen bij elkaar afgebeeld in groepen: 40, 41, 59, en 95 (D1)
27, 29, 45, 64, en 81 (D2)
50, 68, 84, en 86 (D3)

Onder elke steen wordt een drietal gebieden onderscheiden:

- blank gebied : hier ligt de steen nog op de klei.
- grof gearceerd gebied : hier zit ruimte tussen steen en ondergrond; in deze gebieden kan op sommige plekken de steen nog wel op de ondergrond liggen.
- fijn gearceerd gebied : hier is de geul vrij diep.

Om de patronen onder een steen te kunnen schetsen zijn per steen ook de patronen onder de omgevende stenen geschetst om een indruk te krijgen van de continuïteit aan de randen. Op deze wijze kan meer detail in het patroon aangebracht worden. Bij het schetsen is er van uit gegaan dat diepere geulen ook breder zijn: in de schets ontstaan hierdoor naast de uitgevoerde meetraai verbredingen en versmallingen van de geul, die niet direct ondersteund zijn door metingen, want er is slechts één dwars en één langstraai per steen gemeten.

3.6 Slag 7

Een 'intuïtief' gedragsmodel is gebruikt voor een laatste interpretatieslag vóór vrijgave van de gegevens. Het resultaat zijn geulenpatronen die de vorm van een hand hebben. Vergelijking achteraf met de 'echte' gegevens leert het volgende. Uit de in kaart gebrachte geulen blijkt dat het geulenpatroon sterk afwijkt van het geschetste, terwijl

interpretatieslag 6 van de individuele stenen, die uitsluitend gebaseerd was op de diverse uitwerkingen van de grondradargegevens, redelijk tot zeer goed was. Hieruit moet geconcludeerd worden dat de aangenomen uitgangspunten ten aanzien van geulvorming niet correct waren. Het interpreteren op louter radarmetingen is duidelijk beter. Aan deze interpretatie zal verder geen aandacht besteed worden; het resultaat van deze interpretatie is echter wel een leerzame proefexcercitie geweest: interpreteren op basis van "geen gedragsmodel" is beter dan op basis van een slecht gedragsmodel!

3.7 Slag 8

Na vrijgeven van de gegevens betreffende het werkelijke geulenpatroon zijn de radarinterpretaties vergeleken met de feitelijke situatie (Bijlage E1-3). De beschrijving van deze vergelijking is opgenomen in het volgende hoofdstuk. Een laatste interpretatieslag met bijgestelde criteria is tenslotte uitgevoerd.

In bijlagen F1-3 is voor de drie clusters deze interpretaties ingetekend op het waargenomen geulenpatroon. Om de lijn waarlangs de antenne over de steenzetting getrokken is, is het gebied aangegeven waarbinnen de radarantenne zeker invloed heeft. Wat bij de interpretaties verondersteld wordt te gebeuren op de lijn van de meetraai kan ook afkomstig zijn elders uit het aangegeven invloedsgebied. De evaluatie van deze laatste slag is opgenomen in de kwantitatieve vergelijking in paragraaf 4.3

4. HET GEULENPATROON EN DE RADARINTERPRETATIE

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen allereerst per individuele steen de kwalitatieve overeenkomsten en de afwijkingen tussen de resultaten voor interpretatieslag 6 en het gevonden geulpatroon worden weergegeven alsmede worden aangegeven waar deze afwijkingen van afkomstig kunnen zijn. Uit de primaire grondradardata was de conclusie getrokken dat binnen het meetvak een drietal geulenpatronen aanwezig waren; op die plekken zijn 4 of 5 stenen gelicht om zo het patroon onder de stenen op te nemen.

In bijlage E zijn de waargenomen geulenpatronen onder de drie stenenclusters weergegeven; het zijn verkleiningen van de tekening RWS-DWW tek.nr. 88.160 "situatie proefvak gelichte blokken",

De drie geulenpatronen:

Linker geul : stenencluster I : 95, 59, 40 en 41
Midden geul : stenencluster II : 81, 64, 45, 27 en 29
Rechter geul : stenencluster III : 84, 86, 68 en 50.

De in paragraaf 4.2 beschreven vergelijking richt zich op de individuele interpretatie van de gelichte stenen. Alle overige informatie uit de directe omgeving is immers reeds verwerkt in deze interpretatie!

Daarna zal een kwantitatieve vergelijking gemaakt worden van de resultaten van slagen 2,3,6 en 8 met de gegevens van de feitelijke omstandigheden (4.3).

Voorafgaande aan de vergelijking allereerst nog een opmerking over de interpretatie van de horizontale meetraaien A en B. In eerste instantie (slag 2) zijn deze beide raaien met elkaar vergeleken, omdat zij een veel sterker reflectiesignaal gaven dan C-F. De conclusie was dat raai B veel meer holle ruimte vertoont dan raai A. De verklaring werd gezocht in reparaties in rij A, of het om andere redenen uittreden van het water door de naad tussen rijen A en B.

Uit rij A bleken geen blokken gelicht. De detailinterpretaties (slag 6 e.v.) zijn daarom beperkt tot de hoger gelegen raaien. Wanneer we in slag 6 echter raai A volgens dezelfde criteria interpreteren als de raaien B tot en met F dan moet daaruit de conclusie worden getrokken dat raai A bijna geheel ondermijnd is.

4.2 Detailbeschrijving stenenclusters

Voor de vergelijking van het geulenpatroon met de (bewerkte) grondradar data moet men zich realiseren dat de radarantenne slechts over twee of drie raaien op een steen is geweest. In Bijlagen D1-3 is dit aangegeven met de pijltjes aan de randen van de stenen. De informatie in het echogram is afkomstig van deze lijn en een zekere breedte daaromheen. De overige arceringen van de 13 gelichte stenen berusten op een min of meer subjectieve interpolatie van de interpretator. In de beschrijvende vergelijking van de radarinterpretaties wordt consequent geredeneerd vanuit de radarinterpretaties (bijlage D) en nagegaan of deze overeenkomen met de werkelijke situatie (Bijlage E)

4.2.1 Stenencluster I: linker geulenpatroon (bijlagen D1 en E1)

Stenencluster I bestaat uit de stenen 95, 59, 40 en 41.

- Steen nummer 95: het in de radarinterpretatie aangegeven ondiepe patroon is gebaseerd op de horizontale meetraai over het midden van de steen. Het wijkt af van de werkelijkheid; de aanwezigheid van wormgangen (gestippeld in bijlage E1) kan reden geweest zijn voor de lichte variatie in het echogram. De geul rechtsonder is niet aangegeven omdat de kleine variatie hier is toegeschreven aan een 'naaddefect'. In het algemeen is aan afwijkingen 'op' een naad minder gewicht toegekend omdat andere storende factoren gemakkelijk een rol kunnen spelen.
- Steen nummer 59: de aangegeven diepe geul komt overeen met de werkelijkheid. De aangegeven ondiepten links en rechts van de steen zijn echter niet als holle ruimte teruggevonden; mogelijk is het effect afkomstig van de naad zelf.
- Steen nummer 40: het aangegeven diepe gedeelte rechts klopt zeer goed; ook hier geldt dat het ondiepe gedeelte niet duidt op een erosiegeul direct onder de steen; mogelijk speelt de homogeniteit van de klei een rol. De homogeniteit is echter in het verificatie-rapport niet als zodanig in de beschrijving meegenomen zodat vergelijking niet mogelijk is.
- Steen nummer 41: bijna het gehele diepe gedeelte komt weer goed overeen met de gevonden erosie. Het ondiepe gedeelte volgens de radar is niet eenduidig: sommige delen ervan zijn geul en op andere delen sluit de steen aan op de ondergrond; het kleine diepe geultje (midden - rechtsboven) is niet in de radar-data terug te vinden, maar geen van de

raaien loopt recht boven de geul; het kleine signaal is in de radarinterpretatie "uitgesmeerd" weergegeven als het "ondiepe" gebied rechts.

Algemene conclusie over de stenen uit cluster I is dat het diepe gedeelte van de erosiekanalen vrijwel steeds goed is weergegeven. Over de ondiepe gedeelten zijn soms interpretatieproblemen, omdat niet eenduidig is of de geringe afwijkingen in de radaropnamen afkomstig zijn van de ondiepe holle ruimten of van inhomogeen materiaal (klei) of van de naden tussen de stenen.

4.2.2 Stenencluster II: middelste geulenpatroon (bijlage D-2 en E-2)

Stenencluster II bestaat uit de stenen 81, 64, 45, 27 en 29.

- Steen nummer 81: het diep aangegeven gedeelte komt goed overeen met de werkelijkheid. Ook het ondiep aangegeven gedeelte is min of meer nog geul. Het zeer smalle geultje rechts is niet waargenomen; over de hoek rechtsonder zijn geen radargegevens beschikbaar (valt buiten de meetraaien).
- Steen nummer 64: het linkergedeelte is redelijk in overeenstemming met de gevonden erosie (de zeer geringe aanligging op de klei in het midden wordt niet waargenomen); de horizontale ondiepe geul is niet aangegeven, daar de radar slechts een geringe afwijking gaf; de ondiepe rechterkant blijkt bovenin wel een geul te zijn en onderin niet (mogelijk interpretatieprobleem door het naadeffect).
- Steen nummer 45: gelet op de 2 meetraaien over de steen is de vergelijking in goede overeenstemming met de radarinterpretatie (in de buurt van alle hoeken van de steen is niet gemeten).
- Steen nummer 27: het als diep aangegeven gedeelte komt overeen met de in kaart gebrachte erosie; op het ondiepe gedeelte blijkt een smal "eiland" te liggen; de omgeving overstraalt als het ware de niet-reflectie van het eiland.
- Steen nummer 29: gelet op de drie meetraaien verticaal links, verticaal rechts en horizontaal midden is de interpretatie in overeenstemming met de gevonden erosie: de linkerkant, aangegeven als ondiep, bestaat bijna geheel uit smalle ondiepe verticale geulen; de rechterkant, aangegeven als diep, is inderdaad diep; over het midden wordt de erosie dieper van links naar rechts, hetgeen ook in werkelijkheid gevonden is. De horizontale resolutie is duidelijk beperkt door het meetraaiennet.

Algemene conclusie over stenencluster II is dat de diepe gedeelten goed zijn weergegeven; ondiepe delen (tot circa 5 cm diepte) geven interpretatieproblemen.

4.2.3 Stenencluster III: rechter geulenpatroon (bijlage D3 en E3)

Stenencluster III bestaat uit de stenen 84, 86, 68 en 50.

Steen nummer 84: de scherpe diepere geul komt overeen met de in kaart gebrachte erosiegeul.

Steen nummer 86: de zeer ondiepe geul aan de rechterzijde is niet aanwezig; waarschijnlijk gaat het hier om een effect van de naad. De radar neemt de als zeer ondiep geschetste gebiedjes niet waar, maar opgemerkt wordt dat de raai ook juist langs deze gebiedjes loopt.

Steen nummer 68: de linkerkant komt goed overeen: bovenin, waar de naad net op de klei ligt wordt een minder diep gebied aangegeven dan onderin; het ondiepe gedeelte aan de rechterzijde komt goed overeen met de waargenomen erosie; de afwijking van de hoek rechtsonder kan te maken hebben met het naadefect.

Steen nummer 50: de onderste helft van de steen komt goed overeen met de in kaart gebrachte erosie; ook wat betreft diep en ondiep; het puntje rechtsonder is niet door de radar gescand; ook de hoek linksboven is niet door de radar gescand: de geschetste geul is derhalve niet onderbouwd met radarmeetgegevens en een kennelijk onjuiste extrapolatie richting stenen 49 en 65. Het ondiep aangegeven gedeelte boven in het midden blijkt aan te liggen; dit is waarschijnlijk een effect van de iets meer naar links gelegen geul.

Algemene conclusie over stenencluster III is dat op de meetraaien de sterke signalen goed de diepe erosiegeulen weergeven. Geringe variaties in de radarbeelden blijken ook hier niet eenduidig geïnterpreteerd te kunnen worden als holle ruimten.

Het vergelijken van de in kaart gebrachte geulenpatronen met de interpretaties van de grondradardata heeft geleid tot een beter inzicht in de prestaties van de radar met betrekking tot dit onderwerp en in de wijze waarop de radardata geïnterpreteerd dienen te worden. De vergelijking heeft concreet het volgende opgeleverd:

- Daar waar in de feitelijke situatie geulen zijn aangetroffen heeft ook de radar afwijkingen aangegeven; (alleen raai 10 langs steen 29 vormt een uitzondering). Afwijkingen in het

- radarechogram, die duiden op geulen die ondieper zijn dan circa 5 cm bleken niet altijd op geulen te duiden: de stenen bleken soms toch aan te liggen op klei.
- Het in kaart brengen van het gehele verloop van de geul is echter toch moeilijk daar de karakteristieke afmetingen van variaties in de geul vrij klein zijn (orde 10 cm) terwijl er "slechts" gemeten is met een raaiafstand van 0,5 meter.
 - Het meten in twee richtingen geeft duidelijk meer detailinzicht in het verloop van geulen dan mogelijk is op basis van horizontale raaien alleen. Met name uitlopers van het geulenpatroon worden veel accurater in beeld gebracht; zie daarvoor bijvoorbeeld de holtes onder stenen 64 (rechtterrand) en 68 (rechtterrand) die anders zeker gemist zouden zijn.
 - Uit de radarinterpretatie volgt een grotere breedte van de geul dan er in werkelijkheid aanwezig is. Deze vergroting bedraagt 5 á 10 cm (voor geulen dwars op de raairichting 5 cm en voor schuin lopende geulen 10 cm).
 - De radarantenne met een breedte van 16 cm kijkt behalve recht naar onderen ook opzij; het gevolg hiervan is dat zijwaartse informatie tijdens de interpretatie beschouwd wordt als komend van onder de antenne. Met name bij de schuinlopende geulen ten opzichte van de radarmeetraai geeft dit een vergroting van de breedte bij de radarweergave en "naastliggende" geulen worden geïnterpreteerd als "onderliggend, maar ondiep".
 - De linkerkant van de radargeul blijkt dikwijls zeer dicht bij de rand te liggen van de echte geul; bij de rechterkant vindt de verschuiving (breedtevergroting) plaats. Dit duidt op een asymmetrie in de signaalvorming van het reflectiesignaal.
 - De zijdelingse nauwkeurigheid waarmee de positie van de geulen gedetecteerd kan worden, is enkele centimeters (beter dan 5 cm).
 - Kleine variaties van het radarsignaal ter plaatse van de overgang van de steen op de ondergrond hebben duidelijk betekenis, maar deze is niet eenduidig: in het ene geval betekent het signaal in de radar dat er een ondiepe holte is, in het andere geval lijkt er alleen sprake van inhomogene klei. Raaien die in lengterichting over een naad lopen zijn bovendien gevoelig voor kleine variaties in bijvoorbeeld de naadwijdte.
 - De arbitraire intensiteitskeuze welke gedaan is bij de interpretatie van de radargegevens (welke intensiteit noemen we nog een aanduiding van een holle ruimte) blijkt voor sommige geultjes te hoog gekozen te zijn. Naar aanleiding van deze conclusie is de laatste slag 8 uitgevoerd, die in de volgende paragraaf duidelijk een optimalisatie zal blijken te zijn. Het interpreteren aan de hand van een criterium gebaseerd op meerdere niveaus zou mogelijk beter zijn maar vergt meer interpretatietijd.

4.3 Kwantitatieve vergelijking interpretatieslagen

Om tot een kwantitatieve maat voor de kwaliteit van de verschillende interpretatieslagen te komen is voor de in kaart gebrachte gegevens van slag 2,3,6 en 8 bepaald hoeveel raai-centimeters al dan niet correct zijn weergegeven. De overige slagen zijn hierin niet betrokken in verband met de volgende overwegingen.

Slag 1 was een vluchtige interpretatie in het veld die geen ander doel had dan globaal aan te geven waar de 'grote' geulenpatronen zich bevonden teneinde een keus te kunnen maken voor de te lichten stenen. Slag 4/5 was een keuze-analyse, uitgevoerd op de bewerkte data van slag 3; slag 7 was een (achteraf gezien) te ver doorgevoerde poging op basis van een intuïtief gedragsmodel een verdergaande interpretatie te geven, met een uitgesproken negatief resultaat. Kwantificering daarvan is weinig zinvol.

In principe zijn er vier mogelijkheden in de vergelijking, die ook alle vier voorkomen. Er is wel een geul, en de grondradar detecteert deze ook (+/+); er is geen geul, en de grondradar geeft dat ook aan (-/-); er is geen geul maar de grondradar suggereert van wel (-/+); en: er is een geul, maar de grondradar ziet niets (+/-).

Voor de analyse is uitgegaan van de feitelijke omstandigheden op de centrumlijn van de meetraai; uit praktische overwegingen is geen rekening gehouden met de (wel aanwezige) beïnvloeding vanuit een breder gebied (zie bijvoorbeeld Bijlage B en Fl-3); de test voor de grondradar wordt daardoor wat scherper. Ook in het geval van slag 6 (Bijlage D1-3) is van de geschetste (radar-)geulpatronen uitsluitend de informatie op de raaien gebruikt. Verder is de vergelijking getrokken met alle (dwz. diepe en ondiepe) geulen in de interpretatie van bijlage D. De resultaten van deze analyse zijn samengevat in Tabel 1, achtereenvolgens in raai-meters en in % van de totale raailengte. Deze bedraagt 32 maal 0.5 m, dus 16.0 m.

Tabel 1 Vergelijking radarinterpretatie en werkelijke situatie op de raaien

-/- geen geul; radar: idem
+/+ geul ; radar idem
-/+ geen geul; radar:geul
+/- geul ; radar:geen geul

	Slag	-/-	+/+	-/+	+/-	totaal
<u>in m</u>	2	7.8	3.5	0.8	4.0	16.1
	3	6.9	5.3	1.4	2.4	16.0
	6	5.7	7.1	2.9	0.6	16.3
	8	6.8	7.5	1.8	0.2	16.3
<u>in %</u>	2	49	21	5	25	
	3	43	33	9	15	
	6	35	44	18	4	
	8	42	46	11	1	

Allereerst zij opgemerkt dat in de tabel de som van de kolommen 1 en 2 de totale lengte correcte interpretatie weergeeft en de kolommen 3 en 4 de 'onjuiste' lengte. Verder geeft de som van kolommen 1 en 3 de totale werkelijke lengte 'geen geul' weer, en evenzo 2 + 4 de lengte 'geul'. Deze bedragen resp. circa 8.5 en 7.5 m. Onder de raaien over de beschouwde 13 gelichte stenen is dus wel/geen geul vrijwel evenveel voorkomend. De nauwkeurigheid van de getallen in de tabel wordt bepaald door de methode van uitmeten van de figuren in de bijlagen; deze bedraagt ongeveer 1 % in de percentages of 0.2 m in de lengtes.

In de loop van de interpretatieslagen en het beschikbaar komen van geavanceerdere dataprocessing wordt het resultaat beter (slag 2 naar 3: 70% naar 76% correct). De voortgezette interpretatie op basis van hetzelfde materiaal, maar nu op basis van reflectiepulsen (slag 6) geeft geen wezenlijke verbetering (78% correct) in termen van de uitspraak wel/geen geul; alleen een verschuiving van veel fout-positief (grondradar mist bestaande geul, +/-) naar veel fout-negatief (grondradar suggereert niet-bestaande geul, -/+). De hoeveelheid gemiste geul ligt nu in de buurt van 10 % (0.6 van 7.7 m). De waardering daarvan hangt af van de vraagstelling. Is het "erg" dat een geul gemist wordt, of is het "erg" dat vals alarm gegeven wordt?

In het kader van de detaillering van de interpretatie ten aanzien van de kwantitatieve dieptebepaling is slag 6 duidelijk verdergaand dan de voorgaande slagen. Een kwantitatieve waardering daaraan geven is niet zo zinvol omdat er toch niet vergeleken kan worden met andere slagen. Uit de kwantitatieve beschrijving in 4.2 blijkt evenwel dat betrouwbare uitspraken over de diepte mogelijk zijn. Waar de radar "diep" aangeeft is een geul van > 5 cm (meestal wel > 10 cm) aanwezig; waar grondradar "ondiep" aangeeft is een geul van < 5 cm aanwezig, of een andere onregelmatigheid als wormgangen, een diepere geul net naast de raai, of naadeffecten. Bij inspectie van de 10 % "gemiste geul" in deze slag blijken overigens de randen van de geul hier het merendeel aan bij te dragen.

De grote verbetering treedt op in slag 8 (88% correct) waar op basis van calibratie aan de werkelijke data een nieuwe interpretatie gemaakt is, maar wel met een consequent criterium over het hele veld. Helemaal zuiver is deze vergelijking niet omdat de populatie waarop gecalibreerd is, dezelfde is als de populatie waarop gecontroleerd wordt. Wel is dit resultaat te zien als een bovengrens van wat haalbaar is met de indertijd (1988) beschikbare apparatuur. Opgemerkt moet nog worden dat een belangrijk deel (meer dan de helft) van de -/+ en +/- gedeelten langs de grens van geulsystemen zijn gelegen. Het gaat dan dus meer om de kwantitatieve nauwkeurigheid van de breedtebepaling dan om een wel/niet zien van een geul. Ook hier is natuurlijk weer bepalend wat de vraagstelling is: gaat het om het globaal verkennen van waar een uitgebreid geulenpatroon zit, of gaat het om het gedetailleerd volgen van de ontwikkeling van een geulenstelsel.

bladnummer : - 20 -
ons kenmerk: CO-293660/31
datum : mei 1990

In eerste instantie lijkt de daarvoor benodigde nauwkeurigheid niet behaald te zijn; anderzijds is het goed mogelijk dat onbegrepen effecten wel reproduceren en dat een herhaalde meting na enkele jaren door het verschilkarakter van de meting een goed resultaat geeft. Dit zou evenwel een afzonderlijk onderzoek vereisen.

5. CONCLUSIES

Uit het onderzoek aan een steenzetting met behulp van grondradar met een 900 MHz antenne kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- Tijdens de uitvoering van de metingen werd geconstateerd dat 900 MHz metingen een veel beter resultaat gaven dan 300 MHz metingen. De zendpuls van de 300 MHz is zo langdurig dat het interface aan de onderzijde van de stenen daarin 'verdrinkt'. Om die reden is aan de 300 MHz metingen verder geen aandacht geschonken. Wel dient hier gememoreerd dat in feite 900 MHz (of nog iets hoger) de enige redelijke optie is.
- Uitvoering van dit soort metingen op een hellende ondergrond is goed mogelijk, mits enige technische voorzieningen zijn getroffen (geleidegoot, afgesteund op pennen in de bekleding). Opge-merkt moet worden dat deze de dag tevoren door DWW reeds waren aangebracht, hetgeen de vlotte uitvoering van de metingen bevorderde ondanks het experimentele karakter daarvan. Een nauwkeurige plaatsbepaling is cruciaal voor een vlot verloop van de interpretatie.
- De interpretatie in het veld na afloop van de metingen aan de hand van de primaire uitvoer (slag 1) gaf reeds een redelijk beeld van de goede en slechte gedeelten van de steenzetting.
- De verschillende interpretaties aan de hand van de op verschil- lende manieren bewerkte meetgegevens leiden tot de conclusie dat de radar goed aangeeft waar de holle ruimten zitten; geulen dieper dan 5 cm worden vrijwel steeds herkend. Er werden enkele (ondiepe) geulen aangegeven, waar in werkelijkheid de blokken toch aanlagen op de klei.
- De diepteverschillen in de geulen zijn met de gebruikte metho- den moeilijk aan te geven. Wel is er op basis van de afwijkin- gen in het radarechogram een onderscheid te maken tussen ener- zijds ondiepe geulen (tot circa 5 cm diep) of andere afwijkende situaties, en anderzijds geulen dieper dan 5 à 10 cm. Analyse van iedere afzonderlijke scan kan mogelijk meer informatie over de diepte leveren, maar daarvoor dienen de data met een groter dynamisch bereik onvervormd te worden opgenomen. Met de huidige apparatuur is dat mogelijk, met de toenmalige apparatuur niet.
- De zijdelingse nauwkeurigheid is ongeveer 5 cm. De breedte van een geul/holte verkregen uit de grondradardata is in het alge- meen 5 à 10 cm groter dan de gevonden geul; soms is de breedte nagenoeg gelijk aan de werkelijke geulafmeting. De afwijking is afhankelijk van de hoek tussen de lengterichting van de geul en de radarraai.

↳ 5cm interessant
ons wel

- Over de stenen is zowel in horizontale richting als in verticale richting gescand. In het algemeen kan worden gesteld dat de horizontale meetraaien (parallel aan de dijk) voldoende informatie verschaffen over de aanwezigheid van geulen (slag 1, 2, 3). De metingen in verticale richting bevestigen het geulenbeeld. Op basis van alleen verticale metingen is bij de gekozen raaiafstand het geulenpatroon nauwelijks te schetsen. Een probleem daarbij is ook dat de verticale raaien steeds deels over een naad tussen stenen lopen. Combinatie van beide metingen geeft een completer beeld van de vertakkingen in het geulenpatroon.
- Het schetsen van het twee-dimensionale beeld van de geulen onder de steenzetting aan de hand van slechts één horizontale en één verticale scan per steen (lijninformatie) blijkt is moeilijk daar de geulen grillig verlopen binnen de gekozen raaiafstand van 0,5 meter. De details die van belang zijn, liggen in de orde grootte van 10 cm. Een zeer fijn meetraaiennet zou wel een completer beeld kunnen opleveren maar is voor routinematige grootschalige toepassing uit kostenoverwegingen minder aantrekkelijk. Voor het kwantitatief calibreren van een erosiemodel op een beperkt proeftracé is dit echter wel degelijk een haalbare optie.
- Voor het schetsen van het geulenpatroon uit de lijninformatie is inzicht nodig in het erosieproces. Enkele eenvoudige aannames als "De erosie ontstaat aan verticale naden en schrijdt voort in voornamelijk verticale richting," leidt tot een interpretatie die de werkelijkheid slecht benadert (slag 7). Het radarresultaat is beter maatgevend dan de aangenomen erosieprocessen bij een intuïtief aannemelijk, maar verder niet onderbouwd erosiemodel.
- Met betrekking tot doelstelling I van het onderzoek: "Globale inspectie steenzetting" kan aan de hand van de hierboven vermelde conclusies uit het grondradaronderzoek het volgende worden gesteld.
De grondradar geeft een duidelijk onderscheid tussen goede en slechte gedeeltes van de steenzetting; zeker als op de meetdata enkele eenvoudige bewerkingen worden toegepast. Door een goede keuze van de hoogte, in het geval Hulster-Ambacht bijvoorbeeld de derde stenenrij van onder, kan door een enkelvoudige meting (één meetraai) routinematig een steenzetting worden verkend op de aanwezigheid van erosiegeulen onder de bekleding. Voor een snelle uitvoering zullen dan logistieke aanpassingen moeten worden gemaakt; aan de interpretatiezijde zal de data-interpretatie in termen van "wel/geen belangrijke geul" automatisch dienen te gebeuren.



- Met betrekking tot doelstelling II: "Voorspelling ontwikkeling geulenpatroon" kan het volgende worden geconcludeerd. Het kunnen vaststellen van kleine veranderingen in diepte en breedte in de loop der tijd is essentieel voor het kunnen vervullen van deze doelstelling. De in dit proefproject uitgevoerde metingen hebben deze nauwkeurigheid niet bereikt. Voor wat betreft de diepte is de beschikbaarheid van onvervormde reflectiepulsen daarbij van belang (anno 1990 beschikbaar!), voor wat betreft de breedte is een dichter raaiennet (3 à 4 per steen) van belang.
Uit de gevonden geulpatronen onder de stenen kan moeilijk eenduidig worden afgeleid wat de mechanismen van de erosie zijn; op basis van het beeld onder de gelichte blokken lijkt het erop dat de homogeniteit van de kleibekleding onder de stenen een rol speelt. Het vaststellen van, mogelijk subtiele, heterogeniteiten in de klei met behulp van een niet-destructieve methode lijkt vooralsnog zeer moeilijk.

Borgon of niet?

6. AANBEVELINGEN

Aangetoond is dat het technisch en praktisch mogelijk is om de aanwezigheid en de omvang van erosiegeulen onder een steenzetting van betonblokken vast te stellen. In het kader van de beide doelstellingen van het onderzoek wordt het volgende aanbevolen.

1. Toepassing grondradar voor het detecteren van geulen.

- Om routinematig tegen een acceptabele kostprijs geulvorming onder steenzettingen te detecteren in het kader van beheer en onderhoud van waterkeringen dient de huidige radarapparatuur doorontwikkeld te worden tot een "geulendetector". Kenmerken de eigenschappen van een dergelijk systeem zijn het automatisch interpreteren en weergeven van de radargegevens als functie van de positie. De meetapparatuur moet op eenvoudige wijze op het talud van de steenzetting bewogen kunnen worden met een snelheid van minimaal 1 km/uur
- Andere harde dijkbekledingen dan betonblokken dienen onderzocht te worden op de toepasbaarheid van deze techniek voor het detecteren van holle ruimte onder deze dijkbekledingen.

*Kennis van slope
w.b. verbetering?*

2. Modellerings geulontwikkeling en stabiliteit steenzetting.

- De relatie tussen de grootte van een holte en de stabiliteit van de zetting is niet bekend. Er dient een stabiliteitsmodel ontwikkeld te worden dat het verband geeft tussen de stabiliteit en de lengte, breedte en diepte van de geul.
- Het is niet bekend welke factoren geulvorming initiëren, hoe snel de erosie voortschrijdt en welke factoren dit bepalen. Voor planning van onderhoud op basis van een onderzoek met de geulendetector dient bekend te zijn op welke termijn een gedetecteerde geul aanleiding kan geven tot een instabiliteit in de zetting. Er dient een geulontwikkelingsmodel gemaakt te worden.
- Voor het maken van een geulontwikkelingsmodel dient vastgesteld te worden hoe geulen in de tijd veranderen. Op tenminste één representatief proefvak dient met grondradar zeer regelmatig de geulen gemeten te worden. Deze metingen dienen verricht te worden in een meetraaiet met een raaiafstand van 10 cm. De laterale nauwkeurigheid dient verbeterd te worden door een hoogfrequentere antenne (bijvoorbeeld 3 GHz in plaats van 900 MHz) toe te passen. De dieptevaststelling van de geul dient te geschieden op basis van reflectiepuls-analyse.

Hulstke - Amback

BIJLAGE A

Facsimile weergave van interpretatie op de dag van uitvoering (slag 1)



GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soll nl

d d

get

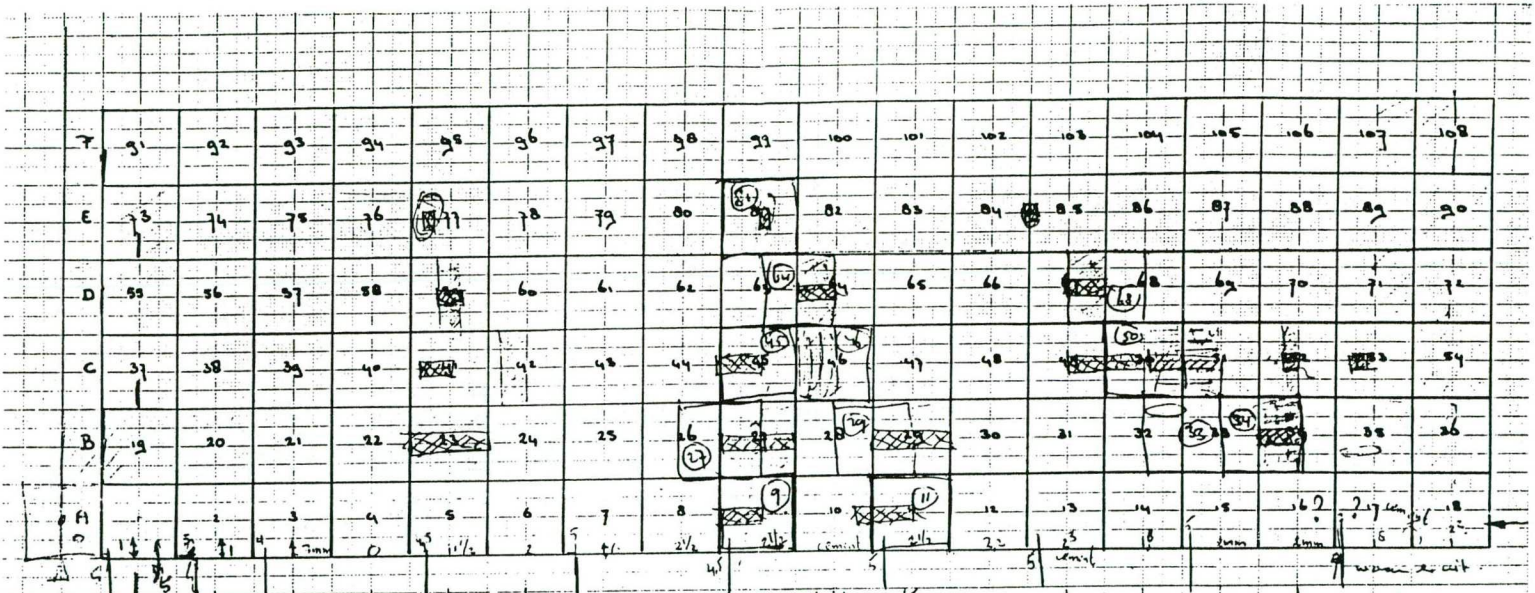
GRONDRADAR GEULENDETEKTIË ONDER STEENZETTING
HULSTERAMBACHT

CO-293660 / 31^{gez}

Facsimile weergave van interpretatie op de dag van
uitvoering (slag 1)

BIL. A

form
A4



Situatie proefvlak

A behuizen 8th 12
B 27 e 29
C use 46 uit gelede water
D 64 ? water punt.

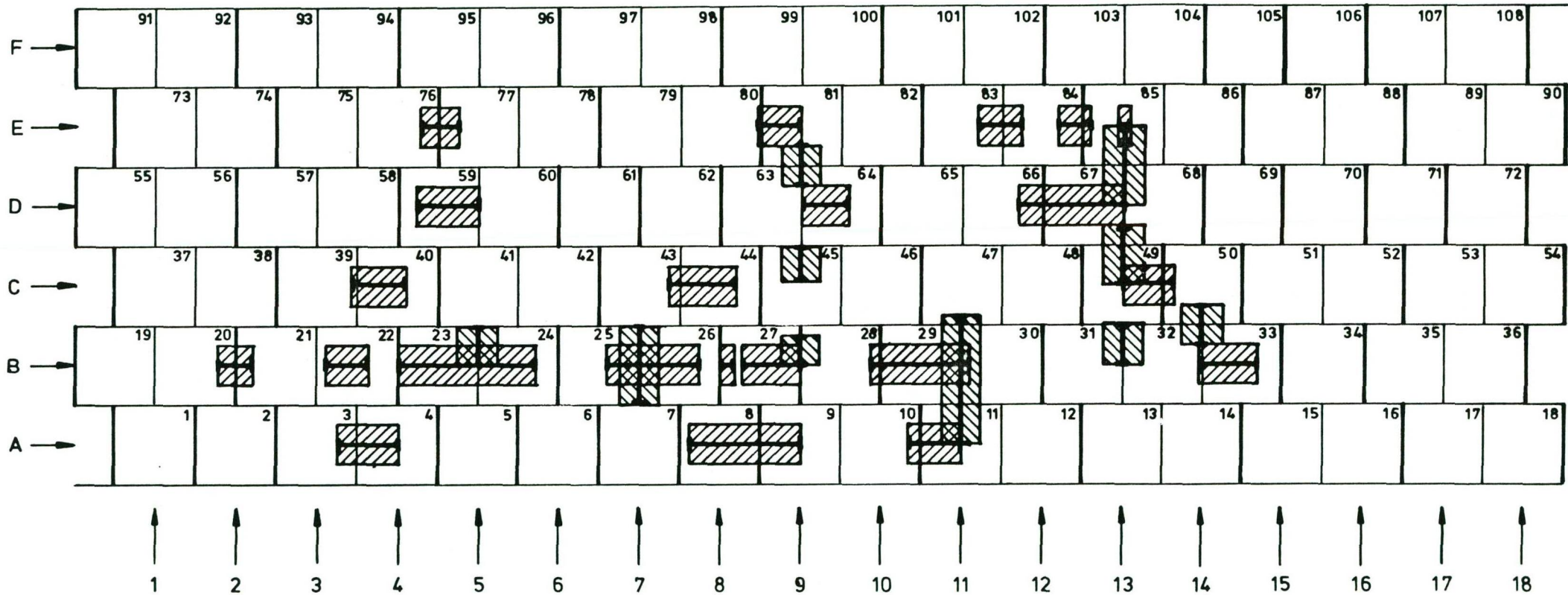
A 15/16/17 behuizen
B 34 (out 53'ertig)
C 50
D 68





7 + 2 ? out.
1 steen op C mit waterlijn steen tussen
11 en 11,5 meter

Principale waterlijn

BIJLAGE B

Interpretatie radardata na slag 2



-  dwarsraaien (1 t/m 18)
-  langsvraaien (A t/m F)
-  meetgebied antenne (langs)
-  meetgebied antenne (dwars)

GRONDMECHANICA DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

uitgevoerd d d

get

GRONDRADAR GEULENDETEKTIE ONDER STEENZETTING HULSTERAMBACHT

CO-293660/

31^{gez}

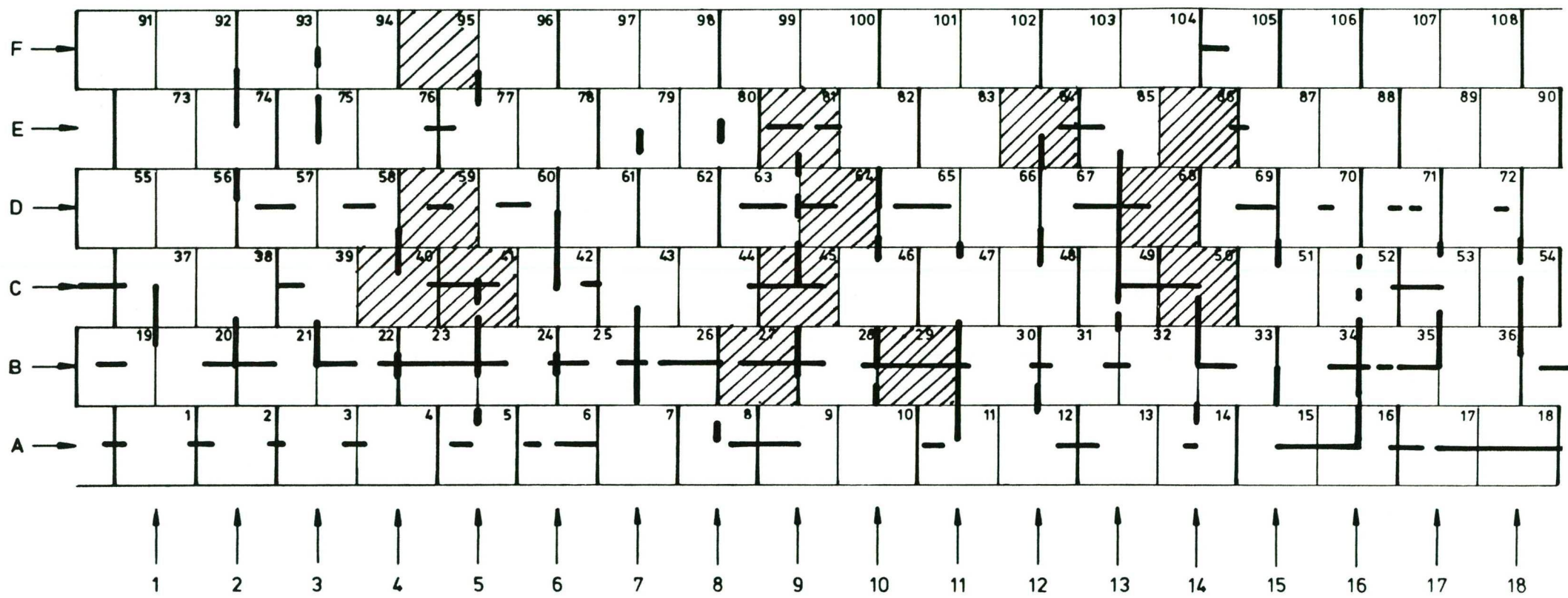
BIJL. B



form
A4



Interpretatie radarata na slag 2

BIJLAGE C

Interpretatie radardata na verwijdering van achtergrondsignaal
(slag 3)

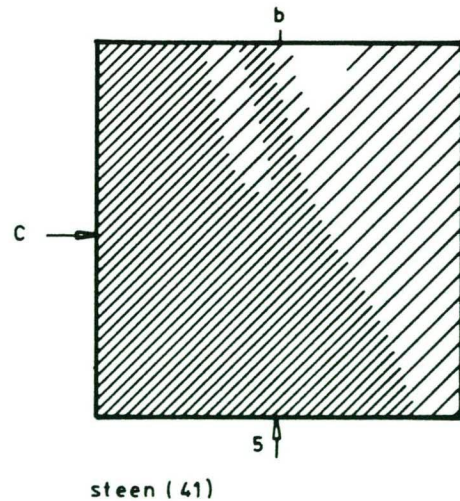
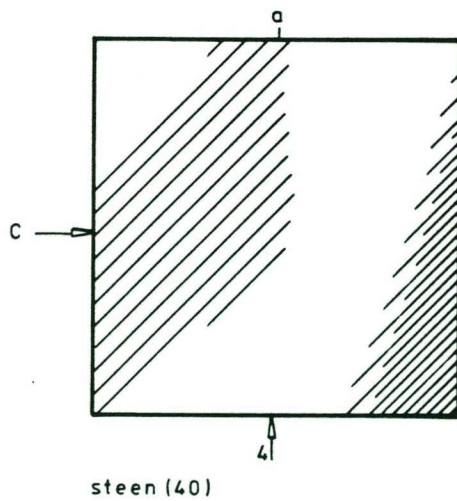
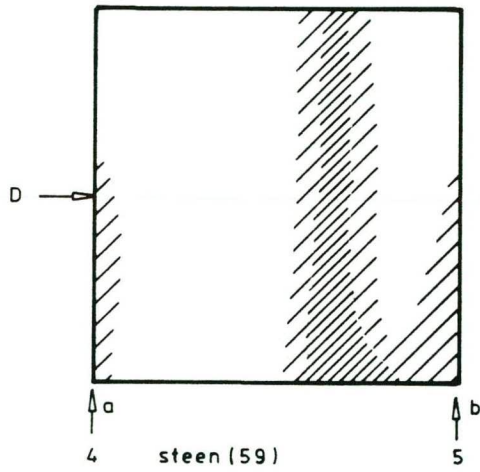
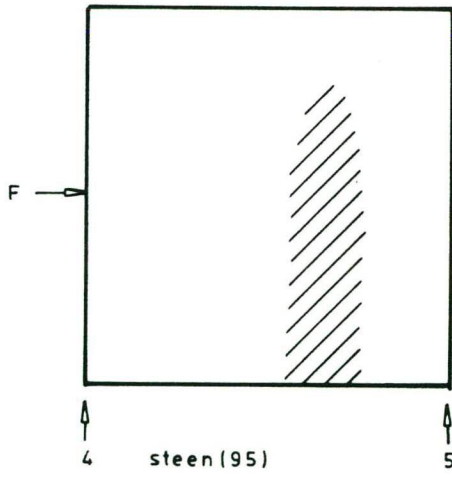



 gedetecteerde geul in dwarsrichting

 gedetecteerde geul in langsrichting

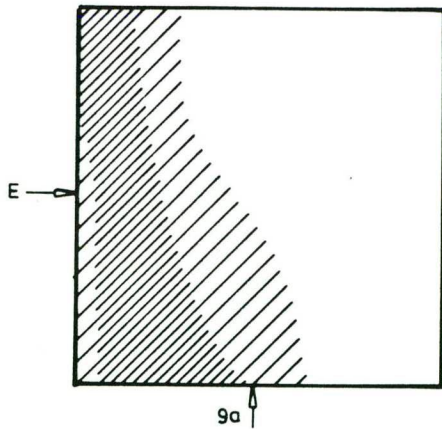
 GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 56 92 23	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	uitgevoerd d d	ge ¹ 
	Interpretatie radardata na verwijdering van achtergrondsignalen (slag 3) Positie gelichte blokken			CO-293660/31
			BIJL. C	te ¹ A 4

BIJLAGE D

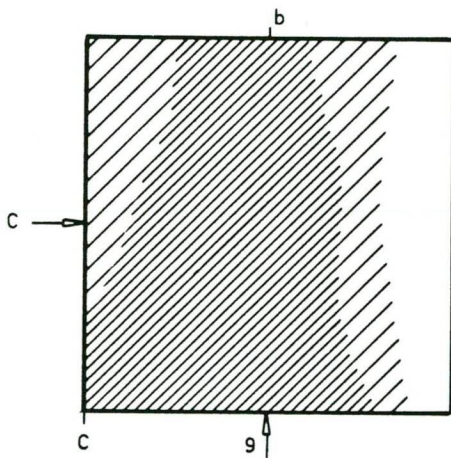
Geulenpatroon uit meest gedetailleerde grondradarinterpretatie zonder informatie van werkelijke situatie (slag 6)



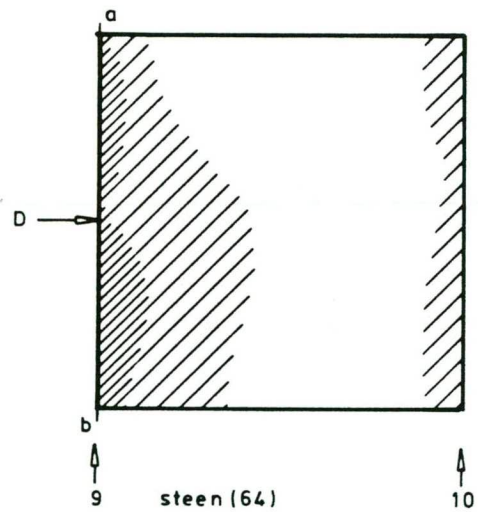
 GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	uitgevoerd d d	get 
Geulenpatroon uit meest gedetailleerde grondradarinterpretatie zonder informatie van werkelijke situatie (slac 6, cluster I)			CO-293660/	gez 31
BIJL. D-1			BIJL. D-1	form. A 4



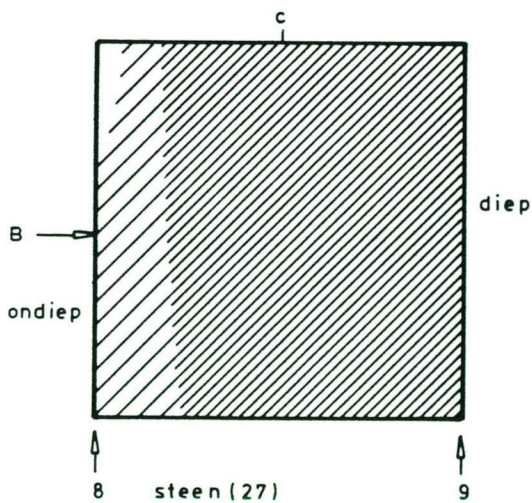
steen (81)



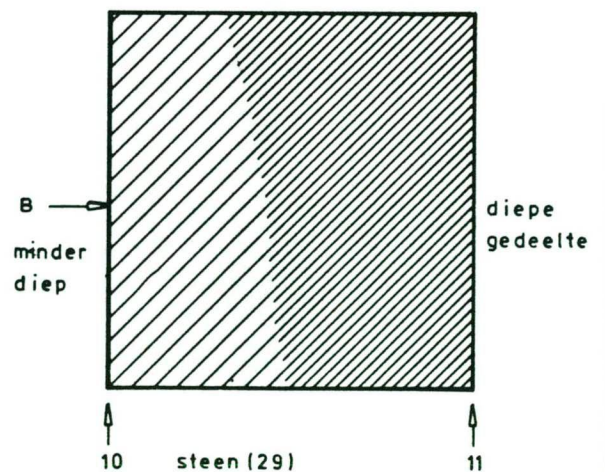
steen (45)



steen (64)



steen (27)



steen (29)



GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

uitgevoerd d d

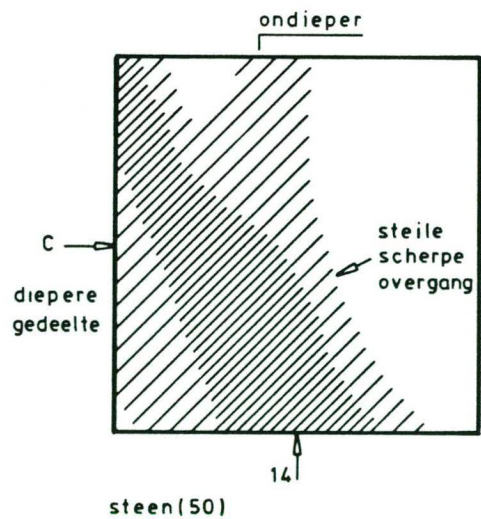
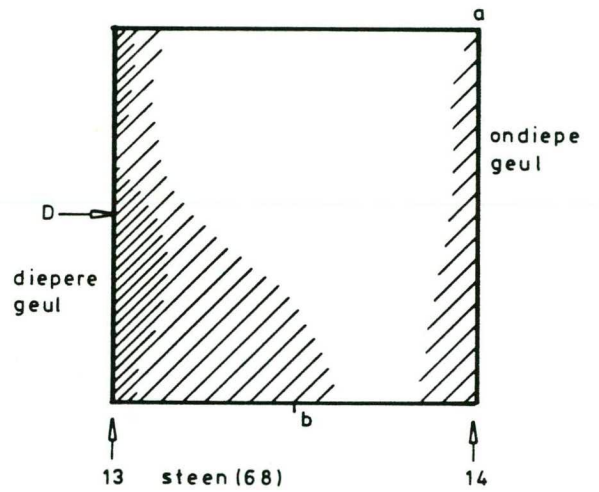
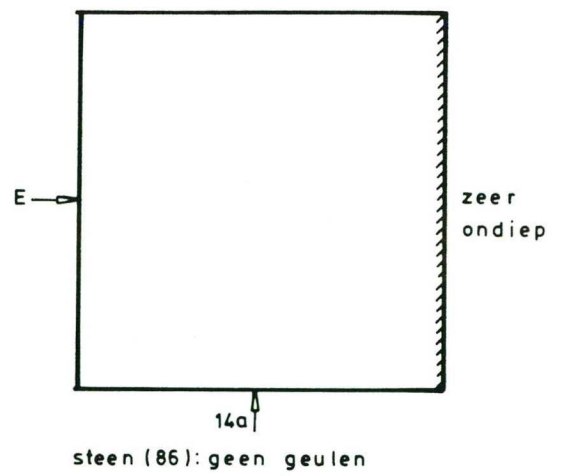
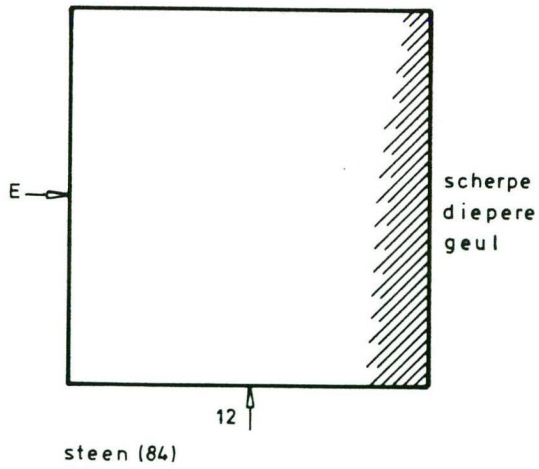
get

Geulenspatroon uit meest gedetailleerde grondradarinterpretatie zonder informatie van werkelijke situatie (slag 6, cluster II)

CO-293660/31^{gez}

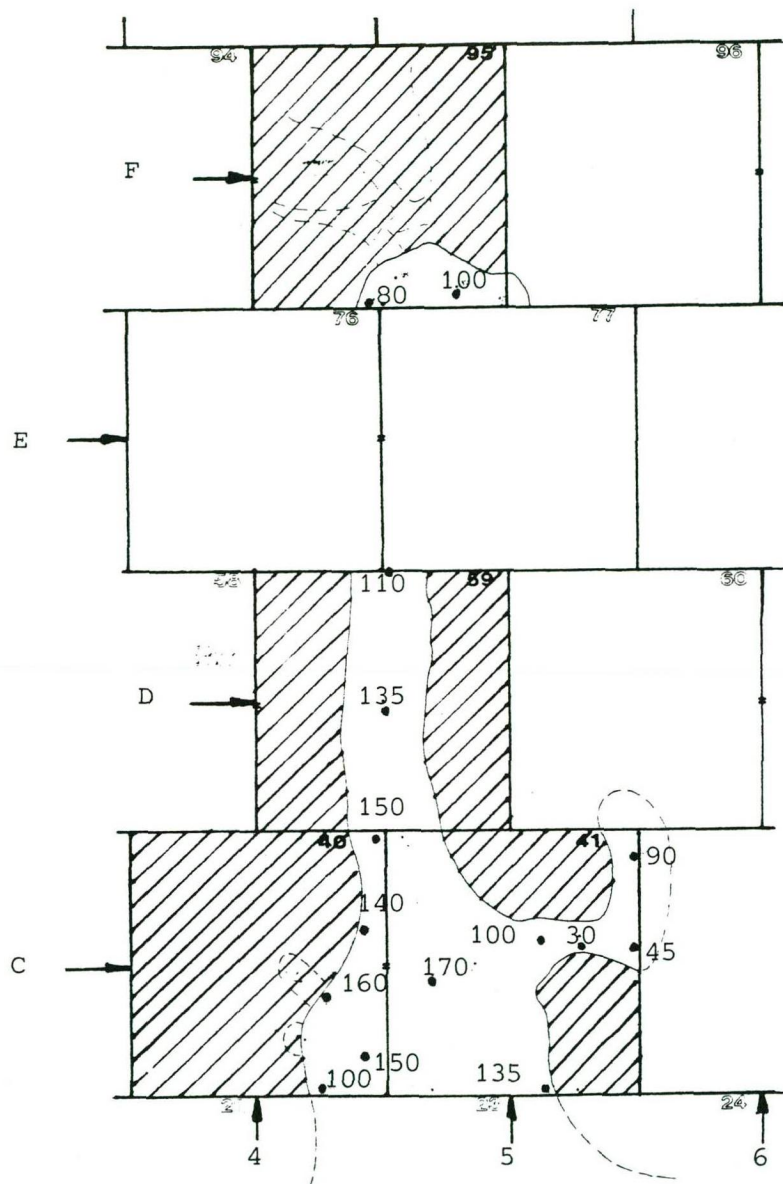
BIJL. D-2

form.
A4



BIJLAGE E

Waargenomen geulenpatroon onder steencluster I, II, III.



Gebied, waar de gelichte steen aansluit op de onderliggende klei

. 140

Diepte geul in mm

**GRONDMECHANICA
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

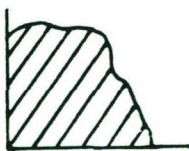
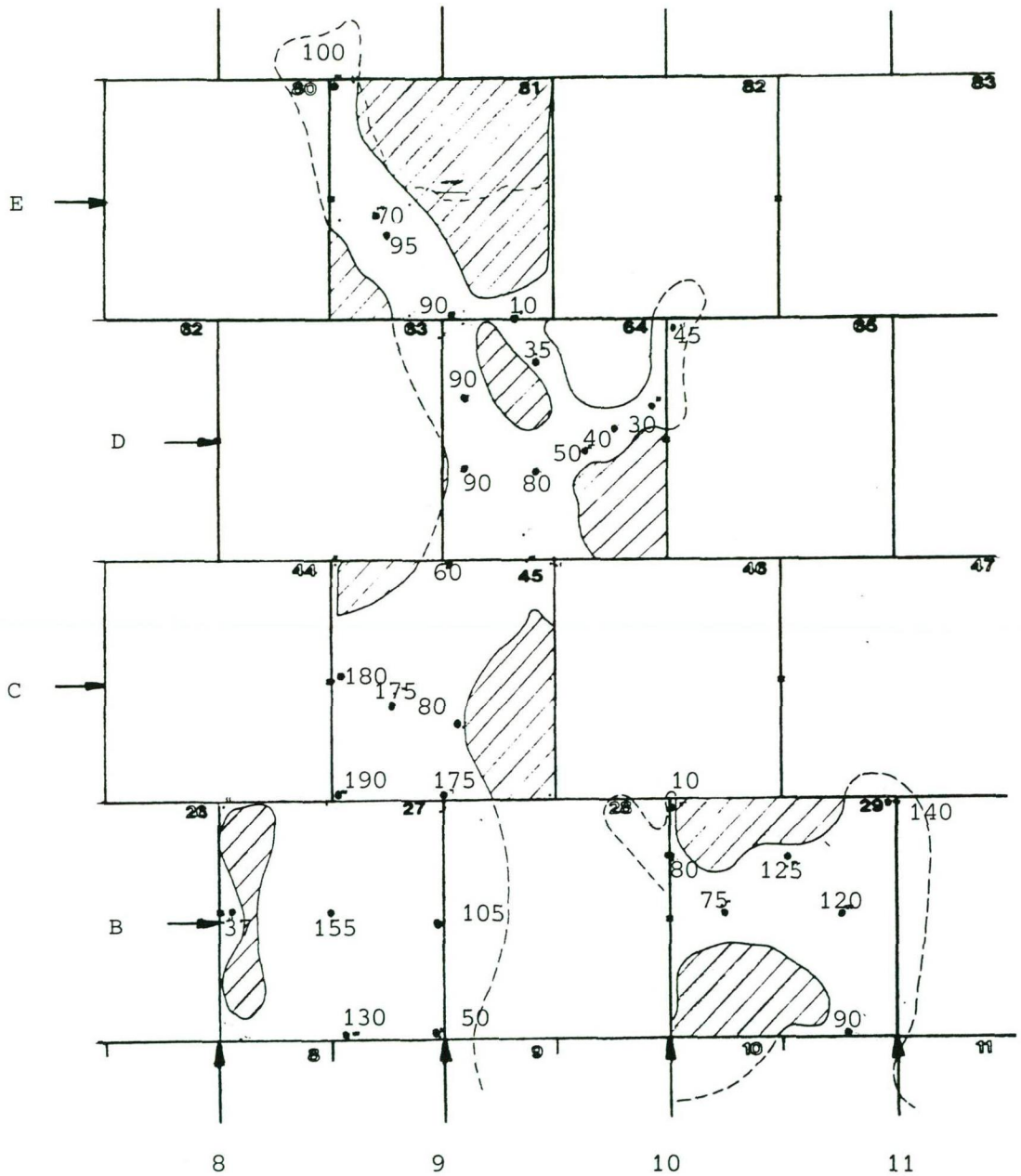
dd

get

Waargenomen geulenpatroon
onder stenencluster I

CO- 293660 / 31^{gez}

BIJL. E-1 form. **A4**

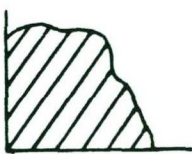
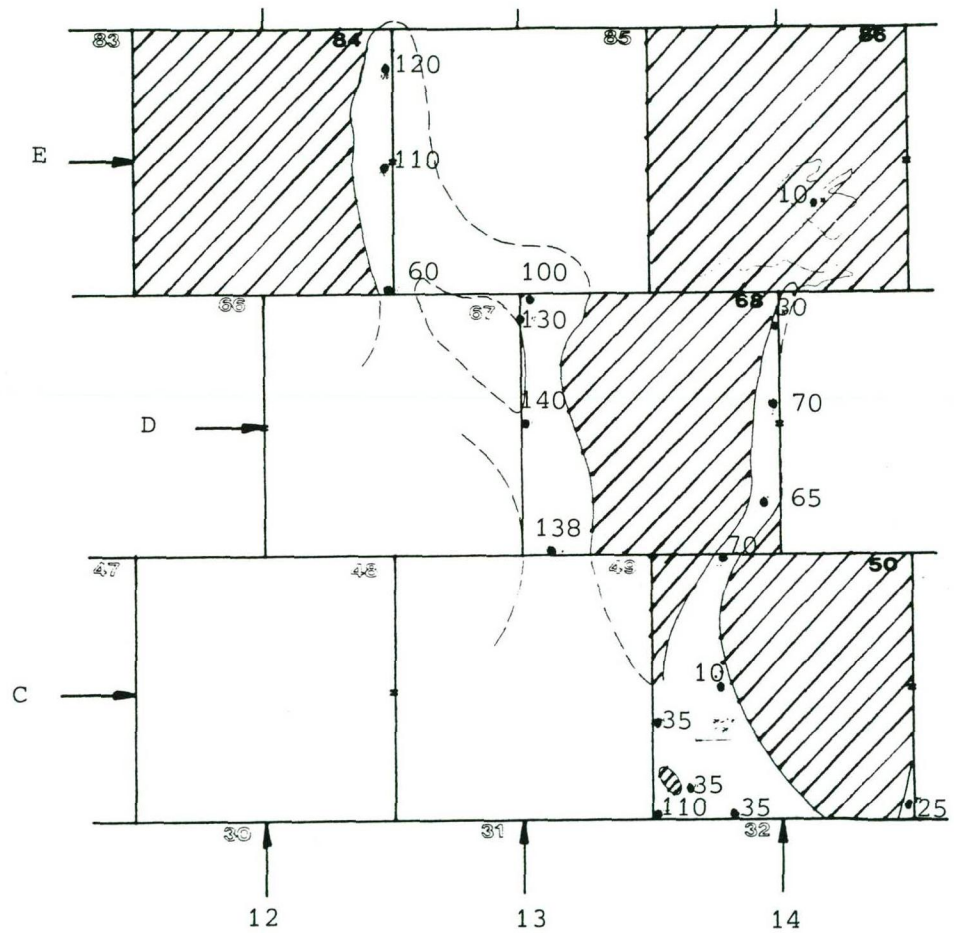


Gebied, waar de gelichte steen aansluit op de onderliggende klei

. 140

Diepte geul in mm

 GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	dd	get.
			CO- 293660 / 31	
Waargenomen geulenpatroon onder stenencluster II			BUL. E-2	form.
			A4	



Gebied, waar de gelichte steen aansluit op de onderliggende klei

. 140

Diepte geul in mm

**GRONDMECHANICA
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d d

get.

Waargenomen geulenpatroon
onder stenencluster III

CO- 293660/31

gez.

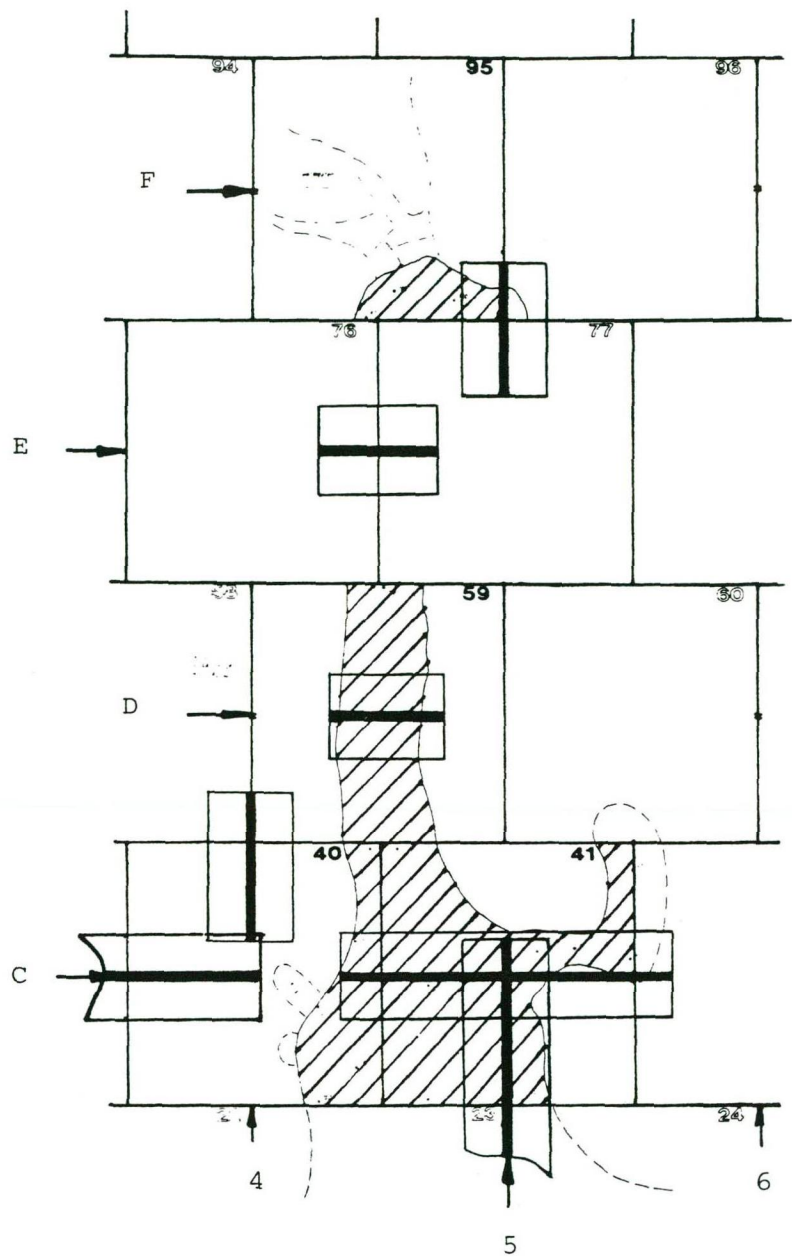
BIJL. E-3

form

A4

BIJLAGE F

Geulenpatroon uit grondradarinterpretatie met informatie van werkelijke situatie (slag 8)



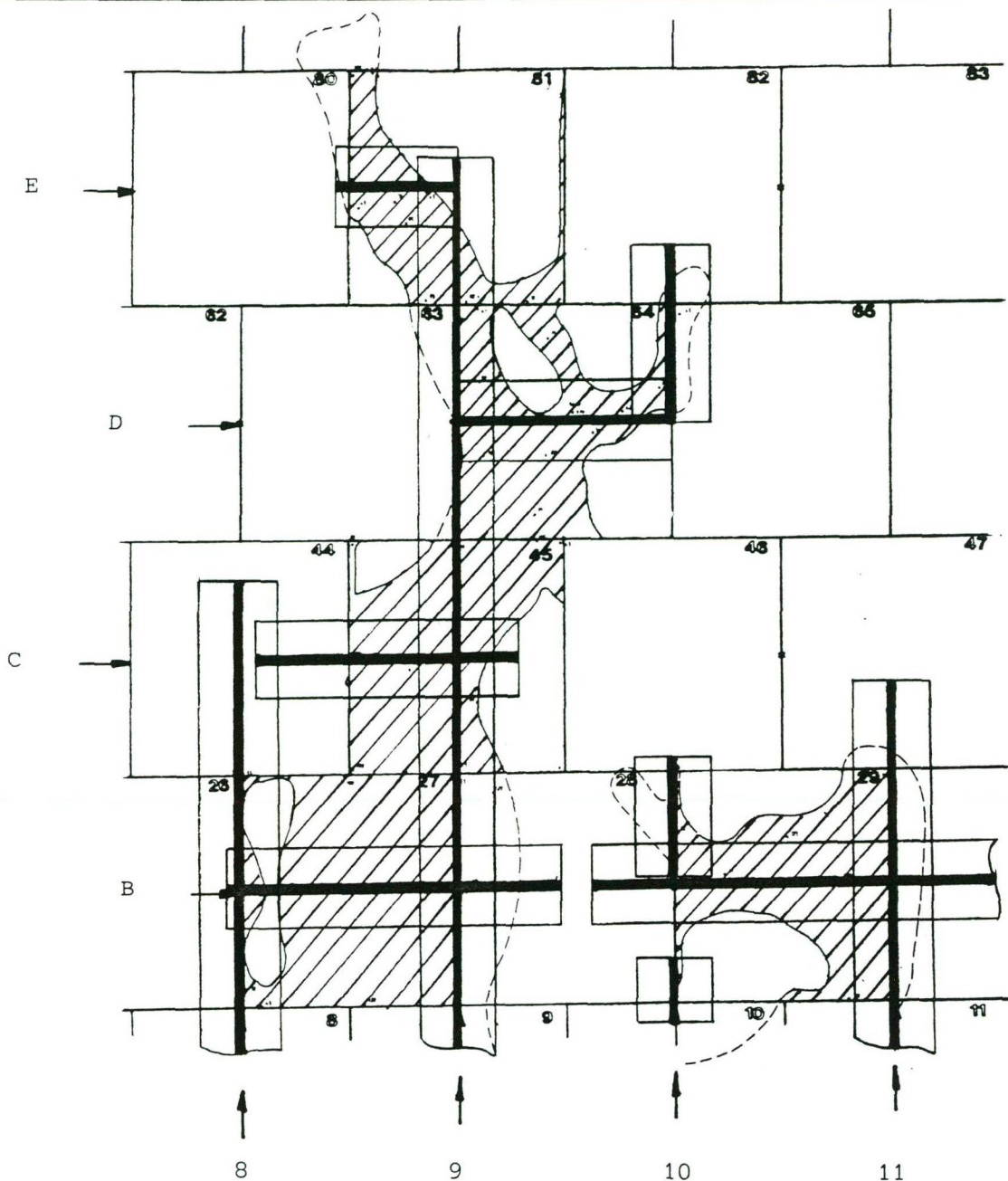
Met radar gedetecteerde holte




Invloedssfeer grondradar



Waargenomen geul onder gelichte stenen



 Met radar gedetecteerde holte

 Invloedssfeer grondradar

 Waargenomen geul onder gelichte stenen

 GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d.

get.

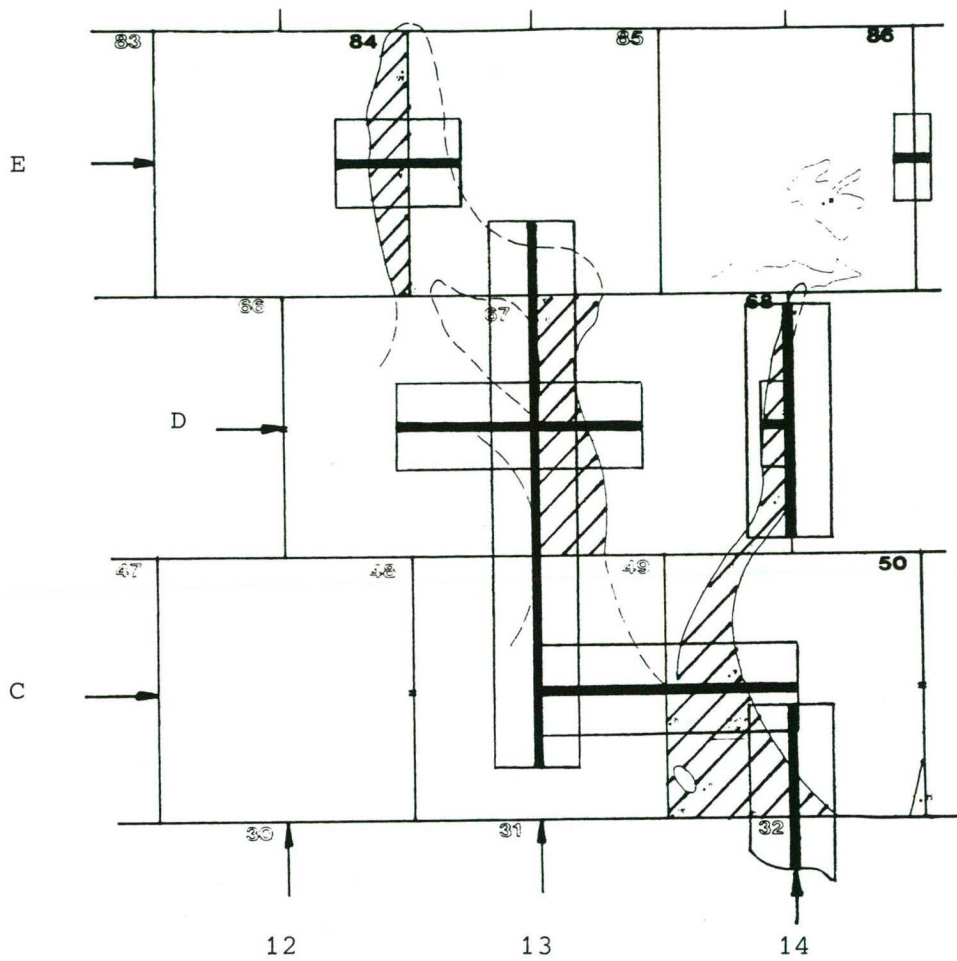
Met grondradar gedetecteerde holten
onder stenencluster II (slag 8)



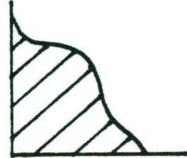
CO- 293660 / 31

BUL. F-2

form.

A4



-  Met radar gedetecteerde holte
-  Invloedssfeer grondradar
-  Waargenomen geul onder de gelichte stenen

 GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 69 35 00	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	d.d.	get.
			CO- 293660/31	
Met grondradar gedetecteerde holten onder stenen cluster III (slag 8)			BUL. F-3	form. A4

