

SV-615

Beslissingsondersteunend systeem
natuurlijke en gestimuleerde
vastlegging van zware metalen in de
verzadigde zone van de bodem

ir. J.J. Steketee, ir. M.H. Nijboer, ing. R.C. Takens (Tauw bv)
ir. J.J. Dijkstra, dr. R.N.J. Comans (ECN)

augustus 2003

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van SKB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Beslissingsondersteunend systeem natuurlijke en gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone van de bodem", augustus 2003, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

SKB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en SKB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens SKB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Copyrights

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of SKB.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©" Decision-making support system for natural and stimulated immobilisation of heavy metals in the saturated zone of the soil ", August 2003, SKB, Gouda, The Netherlands."

Liability

SKB and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and SKB hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of SKB and/or the contributors.

Titel rapport

Beslissingsondersteunend systeem natuurlijke en gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone van de bodem

SKB rapportnummer

SV-615

Project rapportnummer

SV-615

Auteur(s)

ir. J.J. Stekete, ir. M.H. Nijboer, ing. R.C. Takens
ir. J.J. Dijkstra, dr. R.N.J. Comans

Aantal bladzijden

Rapport: 26

Aantal bijlagen: 4

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Tauw bv (M.H. Nijboer, J.J. Stekete, R.C. Takens, D. Lud)
ECN (J.J. Dijkstra, R.N.J. Comans)
Pasminco Budel Zink (S. Pustjens)
Nedcoat Group (K.G. Verhoeven, E. van Rijswijk)
FME CWM (E.C. Alders)
Provincie Drenthe (W.P. van Oosterom) Provincie Gelderland (D. Coppel)
Provincie Utrecht (A.M. Klein Tank) Provincie Noord-Brabant (T. Kamsma)
Universiteit Utrecht, fac. Aardwetenschappen (J.P.G. Loch)
Universiteit Delft, fac Civiele Techniek (R. J. Schotting)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

Sanering of beheersing van locaties met een grondwaterverontreiniging van zware metalen is mogelijk door in-situ immobilisatie, ofwel vastlegging. Op deze wijze worden mobiele metalen gebonden aan de vaste fase van de bodem. Dit kan zowel door natuurlijke als gestimuleerde processen. Technisch gezien moet de bodem voldoende bindingscapaciteit bezitten of moet deze door ingrepen verhoogd worden. Tevens moeten de condities, met name de pH en de redoxpotentiaal, stabiel zijn. Verder mag er uiteraard geen sprake zijn van risico's. Beleidsmatig wordt de haalbaarheid bepaald door de kosteneffectiviteit van de aanpak en de vraag of er (bij voorkeur) een stabiele eindsituatie ontstaat. Om te komen tot een gestructureerde beoordeling en afweging is een beslissingsondersteunend systeem (BOS) ontwikkeld. In dit systeem vindt in 6 stappen een beoordeling plaats van respectievelijk draagvlak en risico's, indicatieve technische haalbaarheid, indicatieve beleidsmatige haalbaarheid, draagvlak bevoegd gezag, definitieve technische beoordeling en definitieve beleidsmatige beoordeling. In dit project zijn de stappen 0-3 ontwikkeld, de stappen 4 en 5 moeten in een volgende fase nog ontwikkeld worden. Uit de toepassing van het BOS op 9 praktijklocaties blijkt dat de beoordeling uitvoerbaar is en dat natuurlijke vastlegging op de meeste sites perspectief heeft. Wanneer dit niet het geval is, is gestimuleerde vastlegging een optie.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen**

bodemsanering, grondwater, in-situ, immobilisatie

Vrije trefwoorden

besluitvormingsproces, stabiele eindsituatie

Titel project

Beslissingsondersteunend systeem natuurlijke en gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone van de bodem

Projectleiding

Tauw bv, Deventer
(ir. M.H. Nijboer, tel. 0570-699627)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Decision-making support system for natural and stimulated immobilisation of heavy metals in the saturated zone of the soil

SKB report number

SV-615

Project report number

SV-615

Author(s)

ir. J.J. Steketee, ir. M.H. Nijboer, ing. R.C. Takens
ir. J.J. Dijkstra, dr. R.N.J. Comans

Number of pages

Report: 26

Number of Appendices: 4

Executive organisation(s) (Consortium)

Tauw bv (M.H. Nijboer, J.J. Steketee, R.C. Takens, D. Lud)
ECN (J.J. Dijkstra, R.N.J. Comans)
Pasminco Budel Zink (S. Pustjens)
Nedcoat Group (K.G. Verhoeven, E. van Rijswijk)
FME CWM (E.C. Alders)
Provincie Drenthe (W.P. van Oosterom) Provincie Gelderland (D. Coppel)
Provincie Utrecht (A.M. Klein Tank) Provincie Noord-Brabant (T. Kamsma)
Universiteit Utrecht, fac. Aardwetenschappen (J.P.G. Loch)
Universiteit Delft, fac Civiele Techniek (R. J. Schotting)

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

Remediation or management of sites with groundwater contaminated with heavy metals is possible by means of on-site immobilisation. Mobile metals are bound to the fixed phase of the soil. This can be achieved by either natural or stimulated processes. In terms of technology, the soil must possess sufficient binding capacity, or it must be increased artificially. The conditions, particularly the pH and redox potential, must be stable. Naturally, there must also be no risks. In terms of policy, feasibility is determined by the cost-effectiveness of the approach and the question of whether (preferably) a stable final situation is created. A decision-making support system (DSS) has been developed in order to facilitate structured evaluation and consideration. In this system, the evaluation takes place in 6 steps: base of support and risks, indicative technical feasibility, indicative policy feasibility, base of support amongst competent authorities, definitive technical evaluation and definitive policy evaluation. This project involved the development of steps 0-3. Steps 4 and 5 must be developed in a follow-up phase. The application of DSS at 9 practical sites has revealed that the evaluation can be carried out and that natural immobilisation has potential at the majority of sites. If this is not the case, stimulated immobilisation is an option.

Keywords**Controlled terms:**

groundwater, heavy metals, immobilisation, on-site, soil remediation

Uncontrolled terms

decision-making process, stable final situation

Project title

Decision-making support system for natural and stimulated immobilisation of heavy metals in the saturated zone of the soil

Projectmanagement

Tauw bv, Deventer
(ir. M.H. Nijboer, tel. 0570-699627)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

INHOUD

		SAMENVATTING.....	V
		SUMMARY.....	VII
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Inhoud van het rapport.....	1
	1.2	Uitgangssituatie	1
	1.3	Doelstelling	2
	1.4	Uitgangspunten.....	2
Hoofdstuk	2	WERKWIJZE.....	3
Hoofdstuk	3	HET BOS IN HOOFDLIJNEN.....	5
	3.1	Inleiding.....	5
	3.2	Stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging	6
	3.3	Stap 1: Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid vastlegging.....	9
	3.3.1	Stap 1.1 Indicatieve beoordeling vastleggingscapaciteit.....	9
	3.3.2	Stap 1.2: Indicatieve beoordeling stabiliteit van vastlegging	11
	3.4	Stap 2: Indicatieve beoordeling saneringsalternatieven op basis van kosteneffectiviteit.....	12
	3.5	Stap 3: Aanvullend onderzoek en overleg bevoegd gezag	13
	3.6	Relatie van de stappen in het BOS met de uitvoering van bodemonderzoek	14
Hoofdstuk	4	SITE-BEOORDELINGEN.....	15
	4.1	Inleiding.....	15
	4.2	Overzicht van de sites.....	15
	4.3	Resultaten stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging ..	16
	4.4	Stap 1: Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid	17
	4.4.1	Vastleggingsindicator	17
	4.4.2	Stabiliteitsindicator	18
	4.5	Stap 2: Indicatieve beoordeling saneringsalternatieven op basis van kosteneffectiviteit.....	18
	4.6	Samenvatting site-beoordelingen.....	19
Hoofdstuk	5	EVALUATIE VAN HET BOS.....	20
	5.1	Inleiding.....	20
	5.2	Gebruikersvriendelijkheid.....	20
	5.3	Beschikbaarheid van gegevens	20
	5.4	Juistheid van aannames en uitkomsten	20
	5.5	Zinvolheid en volledigheid beoordelingen in het BOS.....	21
	5.5.1	Stap 0	21
	5.5.2	Stap 1	22
	5.5.3	Stap 2	22
	5.5.4	Aanvullend onderzoek.....	22
	5.5.5	Belang informatie voor andere saneringsvarianten.....	23
	5.5.6	Samenvatting.....	23

Hoofdstuk	6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	24
	6.1	Conclusies	24
	6.2	Aanbevelingen	25
		LITERATUUR	26
Bijlage	A	GEDETAILLEERDE WERKWIJZE BOS ZWARE METALEN	
Bijlage	B	AANVULLENDE INFORMATIE VASTLEGGINGSINDICATOR	
Bijlage	C	STOF- EN PH-AFHANKELIJKE COËFFICIËTEN OM VASTLEGGING TE BEREKENEN	
Bijlage	D	ECN-RAPPORT “ONTWIKKELING VAN DE VASTLEGGINGSINDICATOR EN DE STABILITEITSINDICATOR” EN EXCEL WORKSHEETS	

SAMENVATTING

Beslissingsondersteunend systeem natuurlijke en gestimuleerde vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone van de bodem

Op veel locaties is het grondwater verontreinigd met zware metalen. Sanering of beheersing vindt plaats door het onttrekken van grondwater. Deze methode blijkt in de praktijk vaak niet erg (kosten)effectief. Vaak moet de onttrekking langdurig worden voortgezet, waarbij grote volumina aan grondwater onttrokken en gezuiverd moeten worden. In-situ vastlegging kan een kosten-effectief alternatief vormen voor onttrekking van grondwater. Hierbij wordt de mobiele metaalfractie gebonden aan de vaste fase van de bodem. Het metaalgehalte in de vaste fase neemt hierdoor veelal slechts marginaal toe. Wel is het van belang dat de binding stabiel is.

Vastlegging van metalen kan plaatsvinden door zowel natuurlijke als door gestimuleerde processen, afgekort als NV, natuurlijke vastlegging en GV, gestimuleerde vastlegging. Stimulatie vindt plaats door dosering van organische substraten of anorganische hulpstoffen. Om de kansrijkheid van vastlegging goed te kunnen beoordelen, is een gestructureerde beoordelings- en afwegingsmethodiek noodzakelijk. Daarom is een strategie voor de beoordeling van vastlegging van metalen ontwikkeld, gevalideerd en geïmplementeerd. Deze strategie is gestalte gegeven in de vorm van een BeslissingsOndersteunend Systeem, kortweg BOS, dat door adviseurs, bevoegde gezagen en eindgebruikers kan worden gebruikt voor de beoordeling van vastleggingsopties.

De algemene opzet van het BOS is als volgt:

1. Eerst wordt gekeken naar de mogelijkheden van natuurlijke vastlegging. Als dit geen perspectief biedt kan worden overgegaan op gestimuleerde vastlegging.
2. De beoordeling vindt stapsgewijs plaats met een toenemende onderzoeksinspanning. De onderzoeksinspanning wordt dus opgevoerd naarmate het perspectief op haalbaarheid groeit.

Het volledige BOS bestaat uit 6 stappen. De inhoud van de stappen is in hoofdlijnen als volgt:

0. Beoordeling draagvlak en risico's (blootstelling, verspreiding, instabiele condities);
 1. Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid (capaciteit en stabiliteit van vastlegging);
 2. Indicatieve beoordeling beleidsmatige haalbaarheid (kosteneffectiviteit, stabiele eindsituatie);
 3. Zonodig aanvullend onderzoek en overleg bevoegd gezag;
 4. Definitieve beoordeling technische haalbaarheid;
 5. Definitieve beoordeling beleidsmatige haalbaarheid.

In dit project zijn de stappen 0-3 ontwikkeld. Het doorlopen van deze stappen resulteert in een indicatieve beoordeling van de haalbaarheid van vastlegging op een bepaalde locatie. Deze beoordeling kan met beperkte inspanningen worden uitgevoerd. Minimaal moet de volgende informatie bekend zijn: draagvlak bij belanghebbenden en bevoegd gezag, bedreigde objecten (actueel en toekomstig), gebruiksbependingen, verontreinigingssituatie, waaronder beschikbare vracht aan metalen, pH en redoxpotentiaal op de locatie. Bij voorkeur moet ook de volgende informatie bekend zijn: macrosamenstelling van de bodem (lutum, humus, CaCO₃, Fe-/Al-oxiden) en van het grondwater (Fe, DOC, SO₄, (bi)carbonaat). Het meest efficiënt is het om de indicatieve beoordeling (stap 0-3) uit te voeren als de resultaten van het nader bodemonderzoek bekend zijn (combinatie is ook mogelijk) en om de definitieve beoordeling (stap 4-5) te combineren met de uitvoering van het saneringsonderzoek.

Voor de beoordeling van alle relevante aspecten zijn criteria ontwikkeld. Belangrijke criteria zijn ondermeer de mate van toekomstige uitbreiding van de pluim, de stabiliteit van de vastlegging, de mate van kosteneffectiviteit in relatie tot andere saneringsvarianten en de bijdrage aan het bereiken van een stabiele eindsituatie. Het doorlopen van het BOS resulteert per stap in een go (groen stoplicht), een no-go (rood stoplicht) of een aanbeveling voor nader onderzoek (oranje stoplicht). Een go betekent dat verder wordt gegaan met de volgende stap van het model, een no-go betekent dat wordt geswitched van natuurlijke naar gestimuleerde vastlegging. Na beoordeling van gestimuleerde vastlegging volgt per stap opnieuw een go of een no-go. Nader onderzoek wordt uitgevoerd als essentiële informatie voor de beoordeling ontbreekt.

Voor de beoordeling van de capaciteit en de stabiliteit van de vastlegging zijn respectievelijk een vastleggings- en een stabiliteitsindicator ontwikkeld. De vastlegging wordt beoordeeld op basis van een pH-/redox-diagram, waarin zowel de vorming van precipitaten als sorptie zijn verwerkt. Als sorptie het bepalende mechanisme is, moet aanvullend worden berekend hoeveel bodemvolume nodig is voor de vastlegging van de metalen. Standaard wordt uitgegaan van een 'arme' bodem, met weinig bindingscapaciteit. De stabiliteit wordt beoordeeld op basis van de zuurbuftercapaciteit van de bodem en de kans op versterking van de redoxcondities.

Het doorlopen van de stappen 0-2 van het BOS resulteert voor 7 van de 9 onderzochte sites in een go voor natuurlijke vastlegging. Twee sites vallen in stap 0 af op basis van ontoelaatbare verspreidingsrisico's van de nevenverontreiniging met CKW's. Op deze sites is gestimuleerde vastlegging wel mogelijk en deze techniek is ook goed te combineren met gestimuleerde afbraak van CKW's. In stap 1 volgt voor alle resterende sites een go op basis van de haalbaarheid van sorptie-bepaalde vastlegging. Dit betekent dat de pluim eerst nog zal toenemen. Deze toename is vrijwel steeds een factor <2 en leidt veelal niet tot risico's bij bedreigde objecten. De lange termijn stabiliteit van de metaalbinding wordt op geen enkele site bedreigd. Op basis van een eerste afweging van saneringsvarianten is NV op de meeste sites waarschijnlijk de meest kosteneffectieve methode voor sanering van de pluim. Voor enkele sites is dit nog onduidelijk. Zeker is dat NV op veel sites gecombineerd moet worden met een bronsanering.

Bij toepassing van NV zal de pluim meestal eerst nog groeien en dit kan een bottleneck vormen voor de praktijktoepassing, aangezien er veelal geen stabiele eindsituatie binnen 30 jaar wordt bereikt. Anderzijds zal er op veel locaties ook in dergelijke situaties geen sprake zijn van actuele risico's. Wel is duidelijk dat gestimuleerde vastlegging een alternatief kan zijn als de verspreiding bij natuurlijke vastlegging onacceptabel is. Gezien de bodemopbouw is het op bijna alle sites technisch mogelijk om substraten in de bodem te brengen.

Op basis van de resultaten van fase 1 wordt aanbevolen om de ontbrekende stappen 4 en 5 van het BOS te ontwikkelen.

SUMMARY

Decision-making support system for natural and stimulated immobilisation of heavy metals in the saturated zone of the soil

Groundwater is contaminated with heavy metals at many sites. Remediation or management is conducted on the basis of groundwater extraction. In practice, this method is frequently not particularly (cost) effective. Extraction must often be carried out over long periods, whereby large volumes of water are removed and have to be purified. On-site immobilisation can be a cost-effective solution to groundwater extraction. This involves binding the mobile metal fraction to the fixed phase of the soil. This usually only marginally increases the metal content of the fixed phase. However, it is important that the binding is stable.

Immobilisation of metals can take place on the basis of either natural or stimulated processes, abbreviated as NI – natural immobilisation or SI – stimulated immobilisation. Stimulation takes place by adding doses of organic substrates or anorganic catalysts. A structured evaluation and decision-making methodology is required in order to effectively evaluate the probabilities of success of immobilisation. This is why a strategy for the evaluation of the immobilisation of metals was developed, validated and implemented. This strategy was given substance in the form of the Decision Support System (DSS), that can be used by consultants, competent authorities and end users to evaluate immobilisation options.

The general structure of DSS is as follows:

1. Firstly, the options for natural immobilisation are studied. If there are no options in this regard, stimulated immobilisation can be used.
2. Evaluation takes place in a phased manner, with each phase involving increasingly intensive research. The intensity of the research is therefore increased in proportion to the increase in feasibility.

The complete DSS consists of 6 steps. The content of the steps is the following in broad terms:

0. Evaluation of the base of support and risks (exposure, spreading, unstable conditions).
1. Indicative evaluation of technical feasibility (capacity and stability of immobilisation).
2. Indicative evaluation of feasibility in terms of policy (cost-effectiveness, stable end situation).
3. Additional research and consultation with competent authority if necessary.
4. Definitive evaluation of technical feasibility.
5. Definitive evaluation of feasibility in terms of policy.

Steps 1 to 3 were developed in this project. Following these steps results in an indicative evaluation of the feasibility of immobilisation at a specific site. This evaluation can be conducted with a limited amount of work. The following information must be known as a minimum: base of support amongst interested parties, objects under threat (current and future), utilisation restrictions, contamination situation, including available load of metals, pH and the redox potential at the site. The following information should preferably also be known: macro composition of the soil (lutum, humus, CaCO₃, Fe-/Al-oxides) and of the groundwater (Fe, DOC, SO₄, (bi)carbonate). The most efficient manner is to carry out the indicative evaluation (step 0-3) when the results of the more detailed soil research are known (combination is also possible) and to combine the definitive evaluation (step 4-5) with the conduction of the remediation research.

Criteria were developed for the evaluation of all relevant aspects. Important criteria include the degree of plume expansion in the future, the stability of the immobilisation, the degree of cost-effectiveness in relation to other remediation variants and the contribution to the creation of a stable final situation. Following DSS results in a go (green light), a no-go (red light) or a recom-

mendation for further research (orange light) for each step. A go means that the following step in the model can be initiated, a no-go means that a switch must be made from natural to stimulated immobilisation. After evaluation of stimulated immobilisation, each successive step is given a go or no-go. Further research is conducted when essential information for the evaluation is missing.

An immobilisation indicator and a stability indicator have been developed for the evaluation of the capacity and stability of the immobilisation.

The immobilisation is evaluated on the basis of a pH-/redox diagram, that incorporates both the forming of precipitates and sorption. If sorption is the determinant mechanism, additional calculation must be conducted regarding the soil volume required for the immobilisation of the metals. The standard assumption is a 'poor' soil with little binding capacity. The stability is evaluated on the basis of the acid buffer capacity of the soil and the chance of disruption of the redox conditions.

Following steps 0-2 of the DSS result in a go for natural immobilisation at 7 of the 9 sites that were researched. Two sites fall away in step 0 due to impermissible spreading risks of the secondary contamination with chlorinated hydrocarbons. Stimulated immobilisation can be used at these sites, and this technology can easily be combined with the stimulated degradation of chlorinated hydrocarbons. All the remaining sites were go in step 1 on the basis of the feasibility of sorption-determined immobilisation. This means that the plume will first increase. This increase is almost always a factor <2 and does not usually cause risks for threatened objects. The long-term stability of the metal binding is not threatened at any site. A first round of consideration of remediation variants leads to the conclusion that NI is probably the most cost-effective method of remediating the plume at the majority of sites. This is still unclear for some sites. It is certain that NI will have to be combined with source remediation at many sites.

If NI is used, the plume will usually continue to expand for some time, and this may form a bottleneck for practical application in view of the fact that it will usually not be possible to achieve a stable final situation within 30 years. On the other hand, there will be no current risks related to this type of situation at many sites. However, it is clear that stimulated immobilisation can be an alternative when the spreading during natural immobilisation is unacceptable. The soil structure means that it is technically possible to introduce substrates into the soil at almost all sites.

On the basis of the results of phase 1, we recommend developing the missing steps 4 and 5 of the DSS.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Inhoud van het rapport

Dit rapport bevat het resultaat van fase 1 van de ontwikkeling van het BOS (BeslissingsOndersteunend Systeem) zware metalen. Dit BOS is bedoeld voor de beoordeling van de mogelijkheden voor vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone van de bodem als sanerings- of beheersingsalternatief. Hiervoor is een stapsgewijze aanpak ontwikkeld. In fase 1 zijn de stappen 0-3 uitgewerkt. In deze stappen worden respectievelijk draagvlak en risico's, indicatieve technische haalbaarheid en beleidsmatige haalbaarheid beoordeeld. In stap 3 wordt zonodig aanvullend onderzoek uitgevoerd en vindt overleg plaats met het bevoegd gezag. In fase 2 van het project moeten nog de stappen 4 (definitieve beoordeling technische haalbaarheid) en 5 (definitieve beoordeling beleidsmatige haalbaarheid) worden ontwikkeld.

In dit rapport worden de doelstelling en de uitgangspunten van het project (vervolg hoofdstuk 1), de werkwijze (hoofdstuk 2), de inhoud van het BOS (hoofdstuk 3) en de resultaten van sitebeoordelingen (hoofdstuk 4) op hoofdlijnen beschreven. In hoofdstuk 5 volgt een evaluatie van het BOS en in hoofdstuk 6 staan conclusies en aanbevelingen. Bijgesloten bij het rapport vindt u een CD-rom met de inhoudelijke onderbouwing van de vastleggings- en stabiliteitsindicator en een spreadsheet voor de ondersteuning van de verschillende berekeningen. Een uitgebreide handleiding voor het gebruik van het BOS staat in bijlage A.

1.2 Uitgangssituatie

Het grondwater in Nederland is op een groot aantal locaties verontreinigd met zware metalen. Het betreft locaties waar bedrijven gevestigd zijn of waren uit het basismetaal, metaalbewerking, thermische verzinkerijen, et cetera, verder stortplaatsen en grootschalige gebieden die verontreinigd zijn door processen als depositie, verzuring, oxidatie en uitloging, bijvoorbeeld de Kempen, en overbemeste zandgronden. De metaalverontreiniging kan als zodanig voorkomen of in combinatie met organische verontreinigingen, met name CKW's (metaalbewerkingsbedrijven). In het geval van stortplaatsen zullen diverse andere stoffen aanwezig zijn, zoals CZV, stikstof en zouten. De omvang van de industriële locaties varieert van klein tot meerdere hectares, een gebied als de Kempen beslaat honderden vierkante kilometers.

Wat betreft organische verontreinigingen als CKW's is er de laatste jaren grote vooruitgang geboekt op het gebied van in-situ sanering. Soms is de natuurlijke afbraakcapaciteit van de bodem voldoende om de CKW's te verwijderen, in andere situaties moet de afbraak gestimuleerd worden door het toevoegen van substraten. In Nobis kader is een beslissingsondersteunend model ontwikkeld voor de beoordeling van de kansrijkheid van natuurlijke afbraak van organische stoffen, met name CKW's en BTEX [1].

Verontreinigingen met zware metalen worden momenteel in hoofdzaak beheerst door omvangrijke en langdurige onttrekking van grondwater, gevolgd door bovengrondse zuivering. Voor een deel van de te onderzoeken locaties is duidelijk dat deze beheersing nog langdurig (tot >100 jr.) moet worden voortgezet. Nog afgezien van de kosten van dergelijke langdurige operaties, is het sterk de vraag of hier sprake is van een positief milieurendement: er wordt zeer veel grondwater onttrokken en gezuiverd, er vindt productie plaats van afval in de vorm van zuiverings-slib en een klein deel van de metalen komt via lozing in het oppervlaktewater terecht. Er is daarom vanuit de markt vraag naar een meer effectieve saneringsstrategie voor zware metalen, zowel uit oogpunt van financiën als milieukosten en -baten.

Een alternatief voor oppompen en zuiveren is in-situ vastlegging. Wanneer de metalen in het *grondwater* in-situ worden vastgelegd door middel van precipitatie, zal dit leiden tot een relatief geringe toename van de gehalten in de *vaste fase* van de bodem. De toename van gehalten is veelal te gering om verontreiniging van de *grond* te kunnen veroorzaken. Dit geldt met name voor pluimen van verontreinigingen, in of nabij de bronzone kan de situatie anders zijn. Verder is er in diepere aquifers wat de vaste fase betreft geen blootstellingsrisico.

1.3 Doelstelling

De doelstelling in brede zin van het project is: *het leveren van een bijdrage aan het ontwikkelen en implementeren van effectieve in-situ beheers- of saneringstechnieken voor zware metalen in de verzadigde zone*. Een veelbelovende optie daarbij is vastlegging van metalen aan de vaste fase van de bodem door natuurlijke processen of door stimulatie van vastleggingsprocessen door additie van stoffen. Om een dergelijke aanpak algemeen te kunnen toepassen, is een goede, gestructureerde beoordelings- en afwegingsmethodiek noodzakelijk. Daarom wordt in dit project een strategie voor de beoordeling van de vastlegging van metalen ontwikkeld, gevalideerd en geïmplementeerd. Deze strategie wordt gestalte gegeven in de vorm van een BeslissingsOndersteunend Systeem, kortweg BOS, dat door adviseurs, bevoegde gezagen en eindgebruikers kan worden gebruikt voor de beoordeling van vastleggingsopties.

Een BOS is een hulpmiddel bij het beslissen of vastlegging (natuurlijk, danwel gestimuleerd) een geschikt beheers- of saneringsalternatief is voor een locatie. Hierbij wordt gekeken of vastlegging in het specifieke geval gedragen wordt door de betrokkenen, technisch (procesmatig) haalbaar en beleidsmatig acceptabel is. In het BOS wordt een stapsgewijze benadering gehanteerd, waarbij in een zo vroeg mogelijk stadium kan worden beslist of vastlegging technisch haalbaar en beleidsmatig acceptabel is. Hiermee wordt onnodige onderzoeksinspanning zoveel mogelijk voorkomen.

1.4 Uitgangspunten

- Vastlegging kan zowel door natuurlijke processen plaatsvinden (natuurlijke vastlegging, natural attenuation) als door ingrepen die reacties op gang brengen, bijvoorbeeld sulfideprecipitatie door injectie van methanol (gestimuleerde vastlegging).
- De mechanismen van vastlegging zijn divers: adsorptie, (oppervlakte-)precipitatie, coprecipitatie, opname in kleimineralen en dergelijke. Op voorhand worden geen mechanismen uitgesloten, wel geldt de eis dat de vastlegging stabiel moet zijn. Dat wil zeggen dat de metalen, door eventuele veranderingen in de locatiecondities, binnen een termijn van 100 jaar niet opnieuw in het grondwater terechtkomen. De beoordeling van de toekomstige condities wordt vereenvoudigd doordat het BOS zich richt op metaalverontreinigingen in de permanent verzadigde zone van de bodem. Op grotere diepte zijn de bodemcondities stabiel dan in de toplaag.
- In dit rapport wordt ervan uitgegaan dat bij een afname van de metaalconcentratie tot de t-waarde voor ondiep grondwater (tussen de streef- en interventiewaarde) de vastlegging voldoende is. In specifieke situaties kan ook voor andere waarden worden gekozen.
- De beoordeling van NV (natuurlijke vastlegging) kan gecombineerd worden met de beoordeling van NA (natuurlijke afbraak). De onderzoeksstrategie is in grote lijnen dezelfde.
- Analoog aan natuurlijke afbraak is (natuurlijke) vastlegging met name bedoeld voor de aanpak van een verontreinigingspluim. De bron zal in de regel op een andere manier aangepakt moeten worden.

Het huidige beleid is uitgangspunt voor dit project. Hierbij wordt uitgegaan van doorstart A5 en van Trechter naar Zeef. Voor mobiele verontreiniging betekent dit dat kosteneffectief verwijderen van de verontreiniging en het bereiken van een stabiele eindsituatie na 30 jaar belangrijke saneringsdoelstellingen zijn.

HOOFDSTUK 2

WERKWIJZE

In de definitiefase van het onderzoek is de beleidsmatige en technische haalbaarheid van vastlegging onderzocht en is een breed gedragen programma van eisen opgesteld voor het te ontwikkelen BeslissingsOndersteunend Systeem (BOS). Draagvlak is verkregen door uit te gaan van een breed consortium, bestaande uit provincies, universiteiten en metaalindustrie. Verder is een workshop gehouden, waarbij naast het consortium enkele onderzoeksinstituten, het Ministerie van VROM en enkele adviesbureaus aanwezig waren.

Geconcludeerd is dat vastlegging onder bepaalde randvoorwaarden beleidsmatig en technisch haalbaar is voor de aanpak van pluimen met zware metalen. Ook werd geconcludeerd dat het haalbaar lijkt om een beslissingsondersteunend systeem (BOS) voor de vastlegging van zware metalen te ontwikkelen, waarin zowel technische als beleidsmatige aspecten worden meegenomen. De ontwikkeling van dit BOS zal in twee fasen plaatsvinden. Er is in de definitiestudie een aanzet gegeven voor de hoofdstructuur van het BOS. Voor verdere informatie wordt verwezen naar de rapportage van de definitiestudie [2].

In deze fase van het project zijn de stappen 0-3 van het systeem ingevuld. Dit is als volgt gebeurd:

- Stap 0 betreft de beoordeling van het draagvlak, de verontreinigingssituatie en een omgevingstoets. Deze beoordeling kan grotendeels worden gebaseerd op reeds uitgevoerd bodemonderzoek en overleg met betrokkenen.
- Stap 1 betreft een *indicatieve* beoordeling van de technische haalbaarheid van vastlegging. Hiertoe zijn vastleggings- en stabiliteitsindicatoren ontwikkeld. De vastleggingsindicator geeft een beoordeling van de kans op vastlegging van metalen in de vorm van een pH-redoxdiagram. Er zijn met geochemische modellen (Geochemist Workbench, Ecosat) stabiliteitsvelden berekend, waarbij de grondwaterconcentratie voldoet aan de t-waarde voor ondiep grondwater. In situaties dat sorptie het bepalende proces is, wordt aanvullend berekend hoeveel metaal per kg bodem wordt vastgelegd, zodat kan worden berekend in welke mate de pluim zich nog zal uitbreiden, alvorens de metaalconcentraties zijn gedaald tot de t-waarde voor ondiep grondwater. Bij alle berekeningen is uitgegaan van een gemiddelde samenstelling van het grondwater in Nederland en een arme bodem, met weinig metaalbindende fasen. Dit betekent dat de uitkomsten van de berekeningen voor veel sites aan de voorzichtige kant zijn in die zin dat de werkelijke bindingscapaciteit groter kan zijn. In deze stap vindt ook een beoordeling plaats van de stabiliteit van de pH- en redoxcondities met behulp van de stabiliteitsindicator. Op basis van de zuurinput via regenwater en de buffercapaciteit van de arme bodem, kan worden berekend of de bodem op termijn kan verzuren. Standaard wordt uitgegaan van de gemiddelde zuurdepositie in Nederland en een arme aquifer, maar er kan ook van andere situaties worden uitgegaan. De kans op verandering van de redoxcondities wordt kwalitatief beoordeeld op basis van de uitvoering van werken en de mogelijke toestroming van aëroob of nitraatrijk water. De vastleggings- en de stabiliteitsindicator zijn ook beschikbaar gemaakt in de vorm van een spreadsheet. Voor een nadere beschrijving van de werkwijze wordt verwezen naar het ECN-rapport [3], dat als PDF-file aanwezig is in bijlage D.
- In stap 2 wordt vastlegging gepositioneerd ten opzichte van andere sanerings- of beheersingsalternatieven, op basis van risico's, milieuverdienste en kosten. Hierdoor wordt inzicht verkregen in onder meer de kosteneffectiviteit en de bijdrage aan het bereiken van een stabiele eindsituatie. Vergelijking van de alternatieven vindt plaats op basis van de verspreiding van de verontreinigingen (ook zonder maatregelen), risico's, kosten, achterblijvende restverontreiniging en nazorgmaatregelen. Voor de afweging wordt gebruikt gemaakt van RMK, dit

is een beslissingsondersteunend systeem dat bodemsaneringsvarianten evalueert, vergelijkt en ordent op basis van Risicoreductie, Milieuvriendelijkheid en Kosten. Een volledige RMK-beoordeling is alleen mogelijk indien een saneringsonderzoek is uitgevoerd. Als dit niet het geval is krijgt de afweging een kwalitatief karakter.

Voor iedere (deel)stap zijn go-no-go criteria geformuleerd. Analooq aan het stoplichten model voor natuurlijke afbraak is er sprake van een rood stoplicht als vastlegging niet haalbaar is (no-go) en een groen stoplicht als vastlegging haalbaar is. Een oranje stoplicht betekent dat de haalbaarheid onzeker is en dat nader onderzoek moet worden uitgevoerd.

In stap 3 vindt aanvullend onderzoek plaats van aspecten die in stap 1 als onzeker zijn beoordeeld. Tevens dienen de resultaten van de stappen 0-3 met het bevoegd gezag te worden overlegd. Stap 3 is op basis van de evaluatie van het concept BOS toegevoegd, deze stap is niet als zodanig onderzocht in dit project.

De ontwikkelde stappen zijn toegepast op gegevens van een negental praktijklocaties. Voor de eerste fase is de diversiteit van de te onderzoeken locaties van groot belang. Hiermee kan worden gewaarborgd dat het BOS algemeen toepasbaar zal zijn op locaties die zijn verontreinigd met zware metalen. Hoewel omvangrijke verontreinigingen met zware metalen alleen in zandige aquifers voorkomen, zijn in verband met de gewenste brede toepasbaarheid van het systeem ook twee locaties onderzocht met een kleiige/venige bodem. De onderzochte locaties zijn verspreid over Nederland: Nieuw Buinen (opvulling van sloten met stortmateriaal), Apeldoorn (voormalige stortplaats), Zeist (voormalig metaalbewerkingsbedrijf), 't Gooi (galvano-bedrijf), Leiden (galvano-bedrijf), Wenum (metaalbewerkingsbedrijf), Bunnik (voormalig metaalbewerkingsbedrijf), Budel (basismetaleel) en Mook (thermische verzinkerij). Op diverse sites is tevens een CKW-verontreiniging aanwezig: Zeist, Leiden, Wenum en Bunnik. Op de locaties Wenum en Bunnik vindt een sanering plaats door injectie van methanol. Doel hiervan is om de CKW-afbraak te stimuleren en gelijktijdig metalen te precipiteren als sulfides. De technische beoordeling van deze twee sites beperkt zich tot de stabiliteit van de redoxcondities. Op de locatie Budel wordt de grondwaterverontreiniging beheerst door een onttrekkingssysteem, op de overige locaties vindt (nog) geen sanering of beheersing plaats. Op deze sites (inclusief Budel) is primair gekeken naar de haalbaarheid van natuurlijke vastlegging.

Voor iedere locatie geldt dat bestaande gegevens zijn geëvalueerd en dat op de meeste sites aanvullend onderzoek is uitgevoerd van grondwater en bodem. In het grondwater zijn aanvullende metingen/analyses uitgevoerd van de redoxpotential en de concentraties van macrocomponenten als ijzer, calcium, DOC, (bi)carbonaat, nitraat en sulfaat. In de grond is het gehalte aan oxalaatextraheerbare ijzer- en aluminiumoxiden bepaald en zonodig het gehalte aan lutum, organische stof en Ca-carbonaat. Door de grote diepte, waarop de verontreinigingen zich bevinden, was grondonderzoek niet op alle locaties mogelijk.

Voor gedetailleerde informatie over het onderzoek op de locaties wordt verwezen naar [4].

Om de bruikbaarheid van het BOS te toetsen is door Tauw een interne workshop gehouden, waarbij 5 medewerkers die niet bij de ontwikkeling van het BOS waren betrokken, een site moesten beoordelen. Op basis van de reacties zijn enkele punten verduidelijkt of verbeterd.

De betrouwbaarheid van de vastleggingsindicator wordt beoordeeld door praktijkwaarnemingen op de sites te vergelijken met de voorspellingen.

HET BOS IN HOOFDLIJNEN

3.1 Inleiding

De hoofdstructuur van het BOS is schematisch weergegeven in figuur 1. Momenteel zijn de stappen 0-3 van het systeem ingevuld. In de volgende paragrafen wordt een beschrijving op hoofdlijnen gegeven van de inhoud van deze stappen. Als deze stappen zijn doorlopen, kan een indicatieve uitspraak worden gedaan over de technische en beleidsmatige haalbaarheid van vastlegging op een bepaalde locatie. Voor een volledige beoordeling moeten de stappen 4 en 5 nog worden ingevuld.

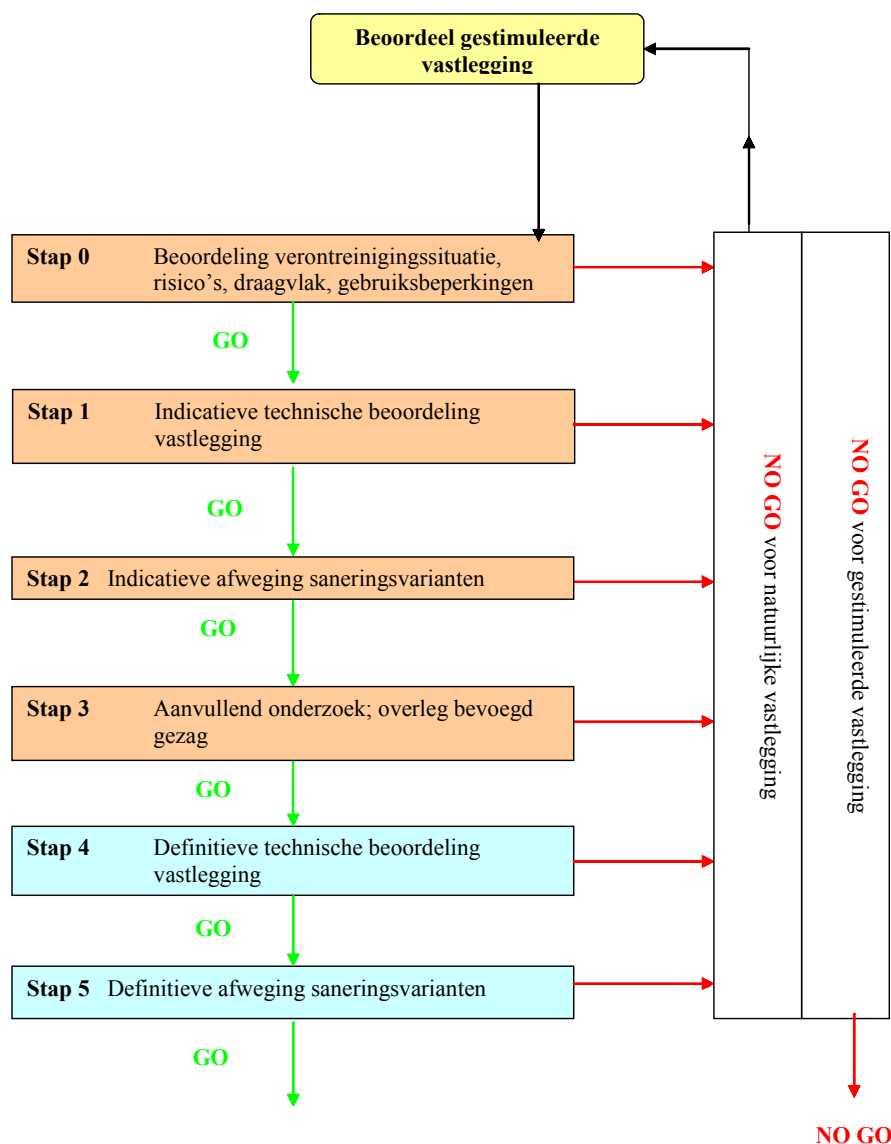


Fig. 1. Schema Beslissingsondersteunend systeem (BOS) voor de vastlegging van zware metalen. Stap 0-3 = indicatieve beoordeling, stap 4-5 = definitieve beoordeling (stap 4-5 moeten nog worden uitgewerkt). Eerst wordt natuurlijke vastlegging beoordeeld, als dit bij enige stap als niet haalbaar wordt beoordeeld kan worden geswitched naar gestimuleerde vastlegging en moeten alle stappen opnieuw worden doorlopen.

De algemene opzet van het BOS is als volgt:

1. Eerst wordt gekeken naar de mogelijkheden van natuurlijke vastlegging. Als dit geen perspectief biedt wordt overgegaan op gestimuleerde vastlegging. Gestimuleerde vastlegging wordt in algemene zin beoordeeld, niet per specifieke techniek. Wel kan op basis van de sitecondities (redox, pH) worden aangegeven of vastleggingsvormen al dan niet stabiel zijn. Metaalsulfiden bijvoorbeeld zijn niet stabiel in zuurstof of nitraathoudend grondwater of in een situatie met een sterk wisselende grondwaterstand.
2. De beoordeling vindt stapsgewijs plaats met een toenemende onderzoeksinspanning. De onderzoeksinspanning wordt dus opgevoerd naarmate het perspectief op haalbaarheid groeit. In stap 0 worden alleen bestaande onderzoeken geëvalueerd en wordt overleg gevoerd met de betrokkenen. In stap 1 wordt op bescheiden schaal aanvullend onderzoek uitgevoerd. Stap 2, de evaluatie van saneringsalternatieven, wordt eveneens gebaseerd op bestaande gegevens. Meer omvangrijk onderzoek wordt pas uitgevoerd in stap 4 en 5. Voor iedere stap geldt dat bij een no-go voor natuurlijke vastlegging kan worden gewisseld naar de beoordeling van gestimuleerde vastlegging. Daarbij moeten alle stappen opnieuw doorlopen worden.

3.2 **Stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging**

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van deze stap is om de perspectieven voor vastlegging te beoordelen op basis van een omgevingstoets (bijvoorbeeld onttrekkingen, gebruiksbependingen), draagvlak bij de betrokkenen en een eerste beschouwing van de verontreinigingssituatie. Stap 0 leidt tot een eerste go/no go beslissing omtrent natuurlijke vastlegging, bij een positief oordeel wordt verdergegaan naar stap 1. Bij een negatief oordeel wordt nagegaan of gestimuleerde vastlegging een alternatief vormt.

Achtergrond

Op basis van aanwezige of eenvoudig te verkrijgen informatie is het al in een vroeg stadium mogelijk om vastlegging als saneringsalternatief in bepaalde gevallen uit te sluiten.

Benodigde informatie

Nader bodemonderzoek, bestemmingsplan (eventueel streekplan), standpunten probleem-eigenaar en eventuele andere direct betrokkenen.

Werkwijze

Er wordt informatie geëvalueerd betreffende de aard en omvang van de verontreiniging, de geo-hydrologische situatie en risico's van de verontreiniging in relatie tot het gebruik van de locatie en de directe omgeving. Daarnaast wordt informatie verzameld over het toekomstige gebruik van de locatie en de directe omgeving. Tevens wordt met de betrokkenen overlegd over het draagvlak voor vastlegging. Vervolgens wordt een eerste toetsing uitgevoerd, zodat kan worden vastgesteld of vastlegging van zware metalen in potentie een reële saneringsvariant is uit het oogpunt van bodembeheer, bodemkwaliteit en toekomstige ontwikkelingen op en rond de locatie. Als daar aanleiding voor is, wordt ook overleg gevoerd met het bevoegd gezag.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor natuurlijke vastlegging

1. Draagvlak bij betrokkenen

Go: de eigenaar, het betrokken bevoegd gezag¹ en andere direct betrokkenen staan open voor een eventuele toepassing van deze saneringsoptie.

No-go: er is geen draagvlak bij de eigenaar van de locatie en/of het betrokken bevoegd gezag en/of andere direct betrokkenen, waarvan de instemming essentieel is.

Nader onderzoek: een deel van direct betrokkenen wijst vastlegging af, anderen staan er wel voor open. Nagaan of er tot overeenstemming kan worden gekomen, bijvoorbeeld door het geven van garanties (faalscenario e.d.) of schadevergoeding.

2. Omvang en plaats van de verontreiniging

Go: (1) er is geen bronzone aanwezig. (2) Er is geen noodzaak of mogelijkheid om de aanwezige bron te saneren. (3) Er moet wel een bronsanering worden uitgevoerd, maar de pluim is van een zodanige omvang dat deze niet eenvoudig met de bronsanering verwijderd kan worden.

No-go: er is een aanzienlijke verontreiniging in de vaste fase van de bodem aanwezig (bronzone) die verwijderd moet worden en de verontreiniging in het grondwater (pluim) is zodanig beperkt van omvang dat deze eenvoudig met de grondsanering kan worden meegenomen.

Nader onderzoek: (1) er is sprake van een beperkte omvang van de verontreiniging van het grondwater in relatie tot de verontreiniging van de grond, terwijl nog onduidelijk is of de grond gesaneerd zal worden (uitvoeren in stap 2 of stap 5). (2) Er is sprake van een beperkte omvang van de verontreiniging van het grondwater, echter het is niet zondermeer duidelijk dat natuurlijke of gestimuleerde vastlegging op deze locatie niet kosteneffectief is (uitvoeren in stap 2).

3. Combinatie met andere verontreinigingen

Go: er zijn geen andere verontreinigingen aanwezig of andere verontreinigingen kunnen door natuurlijke of gestimuleerde afbraak verwijderd worden.

No-go: er zijn andere verontreinigingen aanwezig die uitsluitend door onttrekking verwijderd kunnen worden.

Nader onderzoek: de risico's en/of afbreekbaarheid van andere verontreinigingen zijn onvoldoende duidelijk (uitvoeren in stap 0 door literatuuronderzoek).

4. Huidige verspreiding van de verontreiniging (zie ook criterium 7)

Go: de verontreiniging heeft geen kwetsbare objecten bereikt en vormt geen risico voor mens, vee of natuur.

No-go: de verontreiniging heeft al kwetsbare objecten bereikt en vormt een risico voor mens, vee of natuur.

Nader onderzoek: de risico's zijn niet of onvoldoende in kaart gebracht (uitvoeren in stap 0).

5. Verspreiding over 30 jaar (zie ook criterium 7)

Go: de verontreiniging kan ook onder worst case aannamen binnen 30 jaar geen kwetsbare objecten bereiken.

No-go: de verontreiniging zal zeker binnen 30 jaar kwetsbare objecten bereiken.

Nader onderzoek: de toekomstige verspreiding van de verontreiniging is onvoldoende duidelijk, risico's zijn niet uit te sluiten (verspreidingsberekening in stap 1, eventueel aanvullend grondwatersnelheid of retardatiefactor bepalen in stap 1).

¹ Overleg met het bevoegd gezag vindt alleen plaats als er aanleiding is om dit in een vroeg stadium te doen, anders vindt dit plaats in stap 3.

6. *Uitvoering van werken die de grondwaterstand, -stroming of –kwaliteit beïnvloeden*

Go: er zijn geen indicaties dat zodanig omvangrijke werken uitgevoerd zullen worden dat de verspreiding van de verontreiniging hierdoor belangrijk zal worden beïnvloed.

No-go: er zijn bouwplannen of andere maatregelen bekend die zullen leiden tot zodanige beïnvloeding van de grondwaterstroming dat er sprake zal zijn van ongewenste verspreiding (NB: een bemaling op eigen terrein wordt niet als ongewenst beschouwd. Deze zal resulteren in verwijdering van een deel van de verontreiniging en wellicht in een vermindering van de verspreiding).

Nader onderzoek: er is onzekerheid over de uitvoering van werken die de grondwaterstroming kunnen beïnvloeden of de consequenties van dergelijke werken (uitvoeren in stap 0 of 1 door overleg met betrokkenen).

7. *Gebruiksbeperkingen grond en grondwater in/nabij de verontreinigingspluim*

Go: er zijn geen gebruiksbeperkingen of deze zijn acceptabel voor de betrokkenen.

No-go: de gebruiksbeperkingen zijn niet acceptabel voor betrokkenen.

Nader onderzoek: het is nog onduidelijk of in de toekomst onacceptabele gebruiksbeperkingen ontstaan (onderzoek wat verspreiding betreft identiek aan nader onderzoek criterium 5).

In complexe en/of omvangrijke verontreinigingssituaties is het op voorhand niet uit te sluiten dat natuurlijke vastlegging een deeloplossing kan zijn als deze aanpak voor de locatie *als geheel* op basis van draagvlak of huidige verspreiding afvalt.

Criteria voor gestimuleerde vastlegging

De bovengenoemde criteria gelden in hoofdzaak ook voor gestimuleerde vastlegging. De volgende aspecten worden anders beoordeeld:

5. *Verspreiding over 30 jaar*

Voor de toekomstige verspreiding geldt dat deze sterk kan worden beperkt. Door toepassing van gestimuleerde vastlegging kunnen verontreinigingen in principe binnen één tot enkele jaren worden vastgelegd, waardoor bedreigingen afgewend kunnen worden. Een no-go geldt dan alleen nog als de verontreiniging binnen de uitvoeringsperiode van de sanering (bijvoorbeeld 3 jaar) een kwetsbaar object kan bereiken.

6. *Uitvoering van werken die de grondwaterstand, -stroming of –kwaliteit beïnvloeden*

Voor de uitvoering van werken geldt dat de invloed van toekomstige grondwateronttrekkingen afgewend kan worden als met gestimuleerde vastlegging de metalen op tijd geïmmobiliseerd worden. Aanvullend geldt dan ook de voorwaarde van chemische stabiliteit, zie hiervoor stap 1.2.

7. *Gebruiksbeperkingen grond en grondwater in/nabij de verontreinigingspluim*

Voor gebruiksbeperkingen geldt eveneens dat ze afgewend kunnen worden of de periode van bestaande beperkingen sterk kan worden bekort. Ook hiervoor geldt de voorwaarde van chemische stabiliteit, die in een later stadium wordt beoordeeld.

In complexe en/of omvangrijke verontreinigingssituaties is het op voorhand niet uit te sluiten dat gestimuleerde vastlegging een deeloplossing kan zijn als deze aanpak voor de locatie *als geheel* op basis van draagvlak of huidige verspreiding afvalt.

3.3 **Stap 1: Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid vastlegging**

3.3.1 *Stap 1.1 Indicatieve beoordeling vastleggingscapaciteit*

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 1.1 is om een kwalitatieve tot semi-kwantitatieve beoordeling uit te voeren van de vastleggingscapaciteit van de bodem. Het resultaat is dat een indruk wordt verkregen van de vastleggingscapaciteit en de toekomstige verspreiding van de verontreiniging. Het resultaat is een go-no-go beslissing of een aanbeveling tot nader onderzoek. Bij een no-go beslissing kan gestimuleerde vastlegging als alternatief worden overwogen.

Achtergrond

Metalen kunnen in de bodem worden vastgelegd door precipitatie van onoplosbare verbindingen of door binding aan de matrix (sorptie). Dergelijke reacties zijn te voorspellen indien de samenstelling van het grondwater en de bodem bekend zijn. Bij de ontwikkeling van de vastleggingsindicator is uitgegaan van een gemiddelde grondwatersamenstelling en een 'arme', zandige bodem. Deze condities zijn zodanig gekozen dat naar verwachting de meeste locaties een vergelijkbare of hogere bindingscapaciteit bezitten. Deze benadering leidt tot een eerste, indicatieve beoordeling van de kansrijkheid van vastlegging op een bepaalde locatie. Hiermee wordt voorkomen dat uitgebreid onderzoek wordt uitgevoerd op locaties waar vastlegging geen perspectief heeft. Bij een positieve beoordeling dient nog wel een verificatie plaats te vinden in stap 4 van het BOS.

Benodigde gegevens

pH, redoxpotentiaal en macrosamenstelling van het grondwater (minimaal ijzer, sulfaat, (bi)carbonaat, DOC). Macrosamenstelling van de bodem: organische stof, lutum en gehalte aan ijzer- en aluminiumoxiden. Eventueel kan voor de macro-samenstelling eerst met defaultwaarden worden gerekend. Concentraties en schatting van de vrachten aan verontreinigingen.

Werkwijze

Er wordt uitgegaan van reeds beschikbare informatie, zonodig aangevuld met bepaling van de redoxcondities en macrocomponenten in het grondwater en de bodemsamenstelling. Voor de meest voorkomende metalen zijn pH/redoxdiagrammen geconstrueerd, met daarin drie gebieden: vastlegging is kansrijk (groen), onzeker (oranje) of onwaarschijnlijk (rood). De verkregen pH en redoxpotentiaal worden in deze diagrammen geprojecteerd. Verder wordt een schatting gemaakt van het bodemvolume dat nodig is om de mobiele vracht aan metalen te binden indien sorptie het bepalende proces is. Hieruit kan worden afgeleid in welke mate de pluim zich nog kan uitbreiden. Indien beide toetsingen tot een positief resultaat leiden wordt doorgegaan met stap 1.2. Bij een onzeker resultaat wordt nader onderzoek uitgevoerd. Bij een negatief resultaat worden de mogelijkheden voor gestimuleerde vastlegging nagegaan. De berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een Excel-bestand, dat is bijgevoegd in bijlage D.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor natuurlijke vastlegging

1. *Kan de grondwaterconcentratie door precipitatie of sorptie dalen tot de t-waarde voor ondiep grondwater?* (toetsing met behulp van de vastleggingsindicator, dit is een diagram waarin de metingen van pH en redox van de locatie worden geprojecteerd).

Go: de meetpunten bevinden zich in een groen veld van precipitatiebepaalde vastlegging.

No-go: de meetpunten bevinden zich in een rood veld. Als alternatief worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek 1: de meetpunten bevinden zich in een groen of oranje veld van sorptiebepaalde vastlegging. Ga verder met toetsing van de verspreiding (zie volgende).

Nader onderzoek 2: de meetpunten bevinden zich in een oranje zone van sulfideprecipitatie bepaalde vastlegging. Toets of de concentratie van sulfaat in het betreffende mineraalveld voldoet aan de waarde van ≥ 480 mg/l. Als dit het geval is, volgt alsnog een go. Als de sulfaatconcentratie te laag is blijft de beoordeling onzeker en moet in stap 4 meer gedetailleerd onderzoek worden uitgevoerd.

Nader onderzoek 3: de meetpunten bevinden zich in een (niet gearceerde) oranje zone linksboven in het diagram (in dit gebied zijn Fe-/Al-oxiden instabiel). Bepaal de werkelijke gehalten aan oxiden op de locatie en toets de verspreiding (zie volgende). Verder dient ook het verloop van de pH op langere termijn te worden beschouwd, zie hiervoor stap 3 (paragraaf 3.5). Indien de verspreiding onder de huidige condities acceptabel is of aannemelijk kan worden gemaakt dat de pH door toevoer van grondwater in de toekomst zal toenemen tot een waarde waarbij de verspreiding acceptabel is, volgt alsnog een go. In andere gevallen worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek 4: de pH op de locatie ligt *plaatselijk* in een rood gebied van de vastleggingsindicator door lekkage van zuur of iets dergelijks. Nagegaan moet worden of de buffercapaciteit van de bodem en het grondwater voldoende zijn om het zuur te neutraliseren of, als dit niet het geval is, neutralisatie door additie van stoffen mogelijk is (uitvoeren in stap 3 of stap 4).

2. Wat is de toekomstige toename van de pluim bij sorptie-bepaalde vastlegging en is deze toename acceptabel?

Go: de toename van de pluim is een factor 2 of minder en de pluim bereikt geen kwetsbare objecten.

No-go: de toename van de pluim is een factor 10 of meer. Als alternatief worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek: de toename van de pluim is een factor 2-10 en/of bereikt mogelijk een kwetsbaar object (zie 3.5).

Toelichting bij de getallen: vanuit het beleid is een toename van de pluim ongewenst. Een factor 2 wordt, gezien de beperkte uitbreiding en het indicatieve karakter van de onderhavige berekening, als acceptabel gezien. Een factor 10 is ook bij de onzekerheid van de uitkomst dermate hoog, dat natuurlijke vastlegging in de regel beleidsmatig niet haalbaar zal zijn. Zie echter ook het volgende.

Bij de uitbreiding van de pluim moet altijd rekening worden gehouden met de aanwezigheid van kwetsbare objecten (zie stap 0). Indien ook bij een aanzienlijke toename van de pluim geen kwetsbare objecten worden bedreigd, is er mogelijk toch nog ruimte voor natuurlijke vastlegging. Dit moet worden afgestemd met het bevoegd gezag. Hierbij zal de haalbaarheid van alternatieven een belangrijke rol spelen.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor gestimuleerde vastlegging

Natuurlijke vastlegging biedt geen perspectief als de pH van de bodem zeer laag is of als de sorptiecapaciteit onvoldoende is in relatie tot de verspreiding. Beide factoren kunnen ondervangen worden door bepaalde vormen van gestimuleerde precipitatie. pH-correctie is mogelijk door bijvoorbeeld injectie van bicarbonaat. Bij een hogere pH wordt de natuurlijke bindingscapaciteit van de bodem vergroot. Verder kunnen diverse additieven worden toegevoegd, waarmee precipitatie wordt bevorderd. Uit oogpunt van de bestaande macrochemische condities zijn er op voorhand geen redenen om gestimuleerde vastlegging uit te sluiten. Wel is deze variant niet logisch in het geval van een slecht doorlatende bodem, omdat het substraat dan niet in de bodem kan worden verspreid. Dit leidt tot de volgende beoordeling:

No-go: de bodem van de locatie is dermate slecht doorlatend dat substraten niet goed in de bodem gebracht kunnen worden.

Go: de bodem van de locatie maakt het mogelijk om substraten te doseren.

3.3.2 Stap 1.2: Indicatieve beoordeling stabiliteit van vastlegging

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 1.2 is om een eerste kwalitatieve tot semi-kwantitatieve beoordeling uit te voeren van de lange termijn stabiliteit van de gevormde metaalverbindingen in de bodem. Aangegeven wordt of er in de toekomst remobilisatie kan optreden. Uitvoering van deze stap is relevant voor natuurlijke én gestimuleerde vastlegging.

Achtergrond

De stabiliteit van metaalbindingsvormen op een locatie is met name afhankelijk van de pH en de redoxpotentiaal (Eh). Hiermee wordt rekening gehouden bij de beoordeling van de vastlegging. Bij de stabiliteitsindicator gaat het erom in te schatten in hoeverre pH- en redoxcondities in de toekomst zullen veranderen. De risico's op remobilisatie zijn met name verbonden met verzuring en stijging van de redoxpotentiaal. De kans op een ontoelaatbare pH-daling wordt afgeleid uit de atmosferische zuurdepositie in relatie tot de buffercapaciteit van de bodem. De kans op een ontoelaatbare toename van de redoxpotentiaal wordt afgeleid uit de mogelijke toestroming van geoxideerd grondwater of menselijke ingrepen in het grondwatersysteem.

Benodigde gegevens

- Macrosamenstelling van de bodem in en boven de verontreinigingspluim: gehalten aan lutum, organische stof, Fe-/Al-oxiden en carbonaten (grotendeels identiek aan stap 1.1.). Eventueel kan eerst met default-waarden worden gerekend.
- Kwaliteit van het bovenstroomse grondwater, met name of dit een geoxideerd karakter heeft (zuurstof of nitraatrijk). Dit is alleen van belang indien de verontreinigde aquifer een sulfaat-reducerend milieu heeft.
- Informatie over eventuele ingrepen in het grondwatersysteem (verzameld in stap 0).
- Ligging van de verontreinigingspluim ten opzichte van maaiveld.

Werkwijze

De kans op verzuring wordt berekend met een formule, waarin het calciëgehalte en de diepte van de verontreinigingspluim worden ingevuld. Indien calcië onvoldoende buffert, wordt aanvullend gebruik gemaakt van een curve die de buffercapaciteit van de overige bodembestanden weergeeft. Een verandering van de redoxcondities wordt alleen onderzocht indien uit stap 1.1 blijkt dat sulfideprecipitatie een belangrijk mechanisme is voor de vastlegging. Er wordt nagegaan of geoxideerd grondwater de locatie binnen 100 jaar kan bereiken of dat menselijke ingrepen naar verwachting zullen leiden tot een redoxpotentiaal die buiten het stabiliteitsveld voor sulfiden ligt. Het resultaat is dat de kans op ontoelaatbare verzuring en/of stijging van de redoxpotentiaal zeer gering is (groen veld), onzeker (oranje veld) of groot is (rood veld). Als het resultaat van de beoordeling(en) 'groen' is, is natuurlijke vastlegging kansrijk en wordt verder gegaan met stap 2. Bij een negatieve uitkomst worden de mogelijkheden voor gestimuleerde vastlegging nagegaan. Bij een onzekere uitkomst wordt verder gegaan met stap 3.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor natuurlijke vastlegging

1. *Stabiliteit van de vastlegging in de toekomstige 100 jaar op basis van toekomstige pH* (toetsing met behulp van de vastleggingsindicator, dit is een diagram waarin de toekomstige pH-waarden op de locatie worden geprojecteerd).

Go: de pH blijft op een termijn van 100 jaar binnen groene velden van de vastleggingsindicator.

No-go: de pH verschuift op een termijn van 100 jaar naar een rood veld van de vastleggingsindicator (zie ook volgende).

Nader onderzoek 1: de pH verschuift van een groen veld naar een oranje veld. Zie hiervoor de procedures onder 3.3.1.

Nader onderzoek 2: een beperkt deel (bijvoorbeeld 10-20%) van de aquifer zal in 100 jaar in ontoelaatbare mate verzuren, maar het is mogelijk dat de verontreiniging op grotere diepte weer wordt vastgelegd. Dit aspect dient nader te worden onderzocht in stap 4.

2. Stabiliteit van de vastlegging in de toekomstige 100 jaar op basis van toekomstige redoxpotentiaal indien sulfide-precipitatie het belangrijkste vastleggingsmechanisme is (toetsing met behulp van de vastleggingsindicator, dit is een diagram waarin de toekomstige redoxpotentiaal van de locatie wordt geprojecteerd).

Go: er is bovenstrooms binnen een reistijd van 100 jaar geen grondwater met een geoxideerd karakter aanwezig en er zijn geen aanwijzingen dat werken uitgevoerd gaan worden die resulteren in een onaanvaardbare verlaging van de grondwaterstand of het aantrekken van grondwater met een geoxideerd karakter.

Nader onderzoek: het is niet uitgesloten dat de redoxpotentiaal op termijn gaat stijgen tot buiten het stabiliteitsgebied van de sulfiden (voor oorzaken zie vorige). Uitvoeren in stap 3 (grondwaterkwaliteit, geohydrologie etc. nader beschouwen).

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor gestimuleerde vastlegging

Een negatief oordeel over de stabiliteit van natuurlijke vastlegging heeft geen consequenties voor de haalbaarheid van gestimuleerde vastlegging, zoals die in 3.3.1 is beoordeeld. Zowel verzuring als een toename van de redoxpotentiaal zijn in algemene zin geen belemmering voor gestimuleerde vastlegging. Wel kan dit bepaalde vormen van gestimuleerde vastlegging uitsluiten, omdat de verbindingen op langere termijn instabiel worden als gevolg van oxidatie of pH-verlaging. Een punt voor nader onderzoek is de mogelijkheid om stabiele condities te realiseren door regelmatige herhaling van substraatdosering. Dit moet worden uitgevoerd in stap 2 (kosten, acceptatie bevoegd gezag). Alleen de (on)mogelijkheid om substraten in de bodem te brengen, zoals beoordeeld in 3.3.1, is een absoluut criterium voor gestimuleerde vastlegging.

3.4 Stap 2: Indicatieve beoordeling saneringsalternatieven op basis van kosteneffectiviteit

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 2 is het positioneren van vastlegging ten opzichte van andere sanerings- of beheersingsalternatieven, op basis van kosteneffectiviteit en de bijdrage aan het bereiken van een stabiele eindsituatie. Bij een positief oordeel wordt verder gegaan met stap 3.

Achtergrond

Deze stap wordt uitgevoerd, omdat vastlegging als saneringsalternatief moet passen binnen het overheidsbeleid, zoals vastgelegd in het Kabinetsstandpunt 'Van trechter naar zeef' en doorstart A5 [6 en 7]. Hierin is aangegeven dat men zich bij de verwijdering van verontreinigingen in de ondergrond mag laten leiden door het begrip 'kosteneffectiviteit'. Voor de definitieve uitwerking van stap 2 zou nauw moeten worden aangesloten bij de uitkomsten van het SKB-project ROSA. In dit project wordt gekeken naar een praktische invulling van de beleidsmatige begrippen kosteneffectiviteit en stabiele eindsituatie.

Kosteneffectiviteit kan worden bepaald door een afweging ten opzichte van alternatieven op basis van de relevante kosten en baten. Hieronder worden ondermeer verstaan risico's, milieuvriendelijkheid en kosten. In bijlage A (hoofdstuk 4) staan mogelijke criteria voor de bepaling van kosteneffectiviteit. Bij voldoende gegevens kan in dit stadium een RMK-beoordeling worden uit-

gevoerd. RMK is een beslissingsondersteunend systeem, dat bodemsaneringsvarianten evalueert, vergelijkt en ordent op basis van Risicoreductie, Milieuverdienste en Kosten [5].

Werkwijze

Om inzicht te krijgen in de kosteneffectiviteit van natuurlijke vastlegging en alternatieve saneringsvarianten wordt de volgende werkwijze gehanteerd:

- Bepaling omvang van de verontreiniging;
- Inschatten van de verspreiding van de verontreinigingen, zonder maatregelen (ook zonder natuurlijke vastlegging);
- Bepaling actuele humane risico's in de huidige situatie;
- Globale uitwerking van de saneringsalternatieven (technieken, hoeveelheden, tijdsduur etc.). Hierbij dient tenminste een variant uitgaande van volledige verwijdering te worden uitgewerkt. Daarnaast is het in de meeste gevallen van belang ook een beheersvariant uit te werken;
- Bepaling globale kosten van de saneringsalternatieven;
- Bepaling achterblijvende restverontreiniging en nazorgmaatregelen per saneringsvariant;
- Kwalitatieve afweging van de saneringsvarianten op basis van kosteneffectiviteit (bekijken welke criteria van belang zijn en hoe de varianten hierop beoordeeld worden);
- Inzicht in de belangrijkste factoren die de onzekerheid van de verschillende varianten bepalen;
- Positionering alternatieven op de saneringsladder (zie ook bijlage A, hoofdstuk 4).

Benodigde informatie

Ten behoeve van het uitvoeren van een beoordeling op kosteneffectiviteit en de inschatting van een stabiele eindsituatie is veel informatie nodig over de verschillende saneringsalternatieven. Deze informatie kan in dit stadium gegenereerd worden op basis van expert guess. Wel is het van belang de mate van zekerheid van een bepaalde uitkomst aan te geven. Als al een saneringsonderzoek is uitgevoerd is een meer kwantitatieve beoordeling mogelijk.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor natuurlijke vastlegging

Go: de verwachting is dat NV de meest kosteneffectieve variant is (laagste kosten tegen hoogste opbrengsten) en leidt tot een stabiele eindsituatie (geen monitoring na 30 jaar).

No Go: er zijn goedkopere alternatieven die niet onderdoen qua effectiviteit en wel leiden tot een stabiele eindsituatie.

Nader onderzoek: Het is onduidelijk op basis van de beoordeling hoe natuurlijke vastlegging zich verhoudt tot andere varianten óf geen van de varianten leidt waarschijnlijk tot een stabiele eindsituatie. Veelal zal dit nader onderzoek zich richten op de verwachte pluimontwikkeling. Dit onderzoek vindt in stap 4 plaats.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor gestimuleerde vastlegging

Dit is vergelijkbaar met natuurlijke vastlegging. Gestimuleerde vastlegging heeft echter wel andere onzekerheden (bijvoorbeeld mogelijkheden tot infiltratie) en kosten.

3.5 Stap 3: Aanvullend onderzoek en overleg bevoegd gezag

Indien het in 3.3.1 of 3.3.2 beschreven onderzoek onvoldoende duidelijkheid geeft over de mogelijkheden voor vastlegging, omdat één van de beoordelingen 'oranje' blijft, zal in deze stap aanvullend onderzoek worden uitgevoerd. Op basis van dit onderzoek kan worden beslist of doorgegaan wordt met stap 4 of dat natuurlijke vastlegging geen alternatief vormt voor de betreffende locatie. Indien natuurlijke vastlegging geen perspectief biedt, dienen de mogelijkheden van gestimuleerde vastlegging te worden onderzocht.

De doelstelling van het aanvullend onderzoek is om informatie, die essentieel is voor de beoordeling van de stappen 0-2, in voldoende mate te verkrijgen. Tevens wordt in stap 3 naar aanleiding van de resultaten overleg gevoerd met het bevoegd gezag. Doelstelling hiervan is om de

mening en randvoorwaarden van het bevoegd gezag helder te krijgen. Dit betreft bijvoorbeeld zaken als de invulling van het begrip stabiele eindsituatie (welke pluimuitbreiding wordt acceptabel geacht, over welke tijdsperiode). Op basis van dit overleg kan de onderzoeksopzet van fase 2 (stappen 4-5) nader worden ingevuld.

Afhankelijk van de resultaten van de toetsing van de vastleggings- en de stabiliteitsindicator, kan dit onderzoek op één of meer van de volgende aspecten betrekking hebben.

- a) Controle van default-waarden door monsterneming en analyse.
- b) Analyse van extra grond- of grondwatermonsters op complexe/omvangrijke locaties.
- c) Experimentele bepaling van de adsorptie/desorptie van verontreinigingen door het uitvoeren van schudproeven met grond en grondwater van de locatie.
- d) Bepaling van de zuurbuftercapaciteit van de bodem en het grondwater.
- e) Experimenteel onderzoek naar het effect van oxidatie van aquifer materiaal.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria

De technische beoordeling van de onderzochte aspecten verloopt overeenkomstig de beschrijvingen in stap 1. Het resultaat van het overleg met het bevoegd gezag wordt als volgt beoordeeld:

Go: het bevoegd gezag accepteert de toepassing van natuurlijke vastlegging op de locatie onder realistische randvoorwaarden.

No-go: het bevoegd gezag sluit de toepassing van natuurlijke vastlegging op de locatie uit of stelt onhaalbare randvoorwaarden.

Nader onderzoek: het is onduidelijk of bepaalde randvoorwaarden haalbaar zijn (afhankelijk van de urgentie direct onderzoeken of combineren met uitvoering van stap 4).

Afhankelijk van de uitslag van het aanvullend onderzoek, kan stap 3 worden afgesloten met een go of een no-go voor stap 4. In geval van een no-go moeten de kansen voor gestimuleerde vastlegging worden beoordeeld.

3.6 Relatie van de stappen in het BOS met de uitvoering van bodemonderzoek

De stappen 0-3 van het BOS worden normaliter doorlopen als het nader bodemonderzoek is uitgevoerd c.q. er inzicht is in de aard en omvang van de verontreinigingsproblematiek. Deze indicatieve beoordeling kan worden gezien als een voorbereiding op het saneringsonderzoek. De vervolgstappen 4-5 kunnen het beste gecombineerd worden met het uitvoeren van het saneringsonderzoek. Als het saneringsonderzoek is uitgevoerd (zonder de variant natuurlijke of gestimuleerde vastlegging) kan de beoordeling van stap 2 een kwantitatief karakter krijgen en hoeft in stap 5 alleen aanvullende informatie te worden verwerkt. De uitvoering van de andere stappen blijft inhoudelijk gelijk. Stap 4 kan worden beschouwd als een aanvulling op het saneringsonderzoek.

Als nog geen nader bodemonderzoek is uitgevoerd, maar er wel voldoende inzicht is in de verontreinigingsproblematiek om vastlegging in overweging te nemen, kan de uitvoering van de stappen 0-3 van het BOS ook gecombineerd worden met het nader bodemonderzoek. In het veldwerk moet dan rekening worden gehouden met meting van de redoxpotentiaal in-situ en bemonstering van aquifer materiaal voor onderzoek van de vaste fase. Voor meer details wordt verwezen naar bijlage A.

HOOFDSTUK 4

SITE-BEOORDELINGEN

4.1 Inleiding

Het BOS is toegepast op een negental sites, die beschreven worden in 4.2. Hierbij is uitgegaan van bestaande bodemonderzoeksgegevens, aangevuld met de bepaling van de redoxpotentiaal en de macrosamenstelling van het grondwater. Op enkele (ondiepe) locaties is tevens de macrosamenstelling van de bodem (zoals de gehalten aan ijzer- en aluminiumoxiden) aanvullend onderzocht. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de site-beoordelingen samengevat. Voor de volledige gegevens wordt verwezen naar [4]. Voor de evaluatie van het BOS wordt verwezen naar hoofdstuk 5. Daarin komen vragen aan de orde als de praktische haalbaarheid en de zin van de beoordeling van de diverse aspecten, de noodzaak om het BOS aan te passen, et cetera.

Uit het overzicht van de site-beoordelingen wordt een beeld verkregen van de toepasbaarheid van natuurlijke vastlegging als saneringsvariant en de eventuele bottlenecks daarbij.

4.2 Overzicht van de sites

Kenmerken van de onderzochte sites zijn samengevat in tabel 1. Op de meeste sites is één metaal verreweg dominant. Zink en nikkel zijn de meest frequent aanwezige metalen, daarnaast zijn cadmium, arseen, koper en chroom aangetroffen. Verder zijn op vier van de negen sites CKW's aanwezig en op één site fenol en benzeen. Qua omvang van de vracht en risico's zijn de CKW-verontreinigingen soms belangrijker dan de metalen. De aanwezigheid van de verontreinigingen is tot drie oorzaken te herleiden: (1) bewuste lozing van afvalwater, beitsbaden e.d. in het verleden; (2) lekkages en spills (calamiteiten) en (3) uitloging van afvalstoffen op stortplaatsen of op locaties die zijn opgehoogd met afvalstoffen. Op de meeste locaties is de bron ten minste voor een deel nog aanwezig. Echter meestal is niet duidelijk in hoeverre deze bron nog nalevert of kan naleveren. Zoals verwacht mag worden zijn de omvangrijke, diepe pluimen steeds aanwezig in zandige aquifers. Minder omvangrijke en diepe verontreinigingen zijn aanwezig op locaties met een meer kleiige/venige bodemopbouw of waar dergelijke lagen een verdere verspreiding (nog) kunnen beperken.

Tabel 1. Kenmerken onderzochte sites.

Locatie	Belangrijkste metaal	Oorzaak verontreiniging	Bron nog aanwezig	Nevenverontreiniging	Bodemopbouw (1)	Plaats verontreiniging
Nieuw-Buinen	Cd	Uitloging afval	Ja	Ba, Zn	5 m zand, veenresten	Ondiep (2)
't Gooi	Zn	Lekkage	Deels?		2 m ophooglaag, 3 m klei/veen/fijn zand	Ondiep
Leiden	Ni	Lekkage e.d.	Ja	Zn, Cr, CKW	1,5 m ophooglaag, 2,5 m klei, 7 m kleihoudend zand	Ondiep/diep (3)
Apeldoorn	As	Uitloging afval	Ja	Fenol, benzeen	Zand, op deel locatie kleilaag op 20 m -mv	Diep
Zeist	Ni	Lozing	Klein deel	CKW	30 m zand, 10 m slibh. zand, 5 m klei (4), 30 m zand	Diep
Budel	Zn	Uitloging afval	Deels	Cd, SO4	8 m lemig zand, 12 m zand, 4 m klei (4), 76 m zand	Diep
Mook	Zn	Lozing	Ja	Geen	60 m zand, lokaal grindlagen en kleilagen	Diep
Bunnik	Ni		Nee	CKW	3 m siltig zand, 52 m zand	Diep
Wenum	Cu, Cr	Lozing	Ja	CKW	Zand, 1 m klei op 12 m -mv	Ondiep/diep

(1) van maaiveld naar beneden, alleen verontreinigde lagen zijn genoemd

(2) ondiep: verontreiniging overwegend <5 m -mv

(3) diep: verontreiniging overwegend >5 m -mv

(4) scheidende laag is niet overal aanwezig

4.3 Resultaten stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging

Het doorlopen van stap 0 heeft voor 2 locaties in een no-go geresulteerd voor natuurlijke vastlegging en voor 7 locaties in een go. De no-go geldt voor locaties met een combinatieverontreiniging van metalen en CKW's. De natuurlijke afbraak van CKW's verloopt onvoldoende snel, waardoor deze grondwateronttrekkingen of oppervlaktewater bedreigen. Op deze sites is gekozen voor een combinatie van gestimuleerde afbraak van CKW's en gestimuleerde vastlegging van metalen door sulfide-precipitatie. In tabel 2 wordt per aspect een overzicht gegeven van de resultaten van de beoordeling.

Tabel 2. Resultaten site-beoordelingen stap 0 (totaal 9 sites).

Aspect	Go	No-Go	Onzeker	Onbekend
Draagvlak probleemhebber	7	2	-	-
Omvang/plaats verontreiniging	9	-	-	-
Andere verontreinigingen	5	2	2	-
Huidige verspreiding	8	1	-	-
Toekomstige verspreiding	3	2	3	1
Uitvoering van werken	9	-	-	-
Gebruiksbeperkingen	5	1	2	1

Per aspect volgt een korte evaluatie:

1. Draagvlak: de probleemhebbers staan open voor NV als saneringsvariant, tenzij duidelijk is dat de verspreiding nu al ontoelaatbaar is (dit geldt in concreto met name voor de CKW nevenverontreiniging).
2. Omvang/plaats verontreiniging: de gedachte was eerst dat relatief kleine pluimen niet aantrekkelijk zijn voor NV, omdat deze gemakkelijk met de bron verwijderd kunnen worden of omdat langdurige monitoring van dergelijke pluimen niet loont. Uit de praktijkgegevens blijkt echter dat juist in kleine pluimen NV het snelste verloopt en dat bronverwijdering in veel gevallen onhaalbaar is. Daarom geldt voor alle situaties een go.

3. Andere verontreinigingen: op 4 van de 9 sites zijn organische verontreinigingen aanwezig in de vorm van CKW's (3x) of fenol en benzeen (1x). De CKW's verspreiden zich sneller dan de metalen en kunnen daarom de saneringsmethode dicteren. Gestimuleerde anaëroabe afbraak van CKW's is goed te combineren met sulfide-precipitatie van metalen, gestimuleerde aëroabe afbraak met sorptie van metalen. Het verloop van de (natuurlijke) afbraak van verontreinigingen is niet altijd voldoende duidelijk.
4. Huidige verspreiding: voor slechts 1 site geldt dat de verontreiniging al een kwetsbaar object (oppervlaktewater) heeft bereikt. Hierbij gaat het om CKW's.
5. Toekomstige verspreiding: het beeld van de toekomstige verspreiding is minder duidelijk. Voor 3 sites is onzeker of kwetsbare objecten worden bereikt en voor 1 site is dit onbekend. Voor 2 sites worden de risico's als onacceptabel beschouwd. Het bereiken van een kwetsbaar object is overigens geen reden om NV af te schrijven. Een drinkwaterbedrijf geeft aan dat de aanwezige nikkelverontreiniging in het zuiveringsproces voldoende kan worden verwijderd. Over kleine onttrekkingen kan onderhandeld worden om deze tegen vergoeding te beëindigen. De onzekerheden die gelden voor een aantal locaties zijn niet zodanig dat eerst aanvullend onderzoek moet worden uitgevoerd alvorens verder kan worden gegaan met de site-beoordeling.
6. Uitvoering van werken: voor zover bekend levert dit nergens problemen op. In dit stadium zijn geen streekplannen bestudeerd, het is ook de vraag of dit voldoende specifieke informatie oplevert.
7. Gebruiksbeperkingen grondwater: op enkele locaties is dit onzeker, omdat de toekomstige verspreiding onvoldoende duidelijk is.

4.4 **Stap 1: Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid**

4.4.1 *Vastleggingsindicator*

Voor alle locaties volgt een go, omdat de meetpunten van pH en redoxpotentiaal in een groen gebied van sorptie-bepaalde vastlegging liggen. Het is niet vreemd dat sorptie altijd het dominante proces is, omdat precipitatie, voor zover het voldoende effectief is, in de praktijk al zal zijn opgetreden. Daarmee is ofwel de verontreiniging op natuurlijke wijze gesaneerd, ofwel het vastleggingsmechanisme is verschoven van precipitatie naar sorptie. Verder blijkt uit de redoxmetingen dat op vrijwel geen enkele locatie sulfaatreducerende condities optreden, zodat sulfideprecipitatie geen belangrijke bijdrage kan leveren aan de natuurlijke vastlegging. Overigens is het wel belangrijk dat informatie wordt verkregen over de aard van het vastleggingsmechanisme, omdat bij sorptie een aanvullende verspreidingsberekening moet worden uitgevoerd.

Hoewel in pluimen sorptie waarschijnlijk in veel gevallen 'haalbaar' is, moet in zones dichterbij de bron wel rekening worden gehouden met een no go. Dit geldt in elk geval voor één locatie, waar veel zuur in de bodem is geloosd. Het is ook denkbaar dat de bodem van een locatie volledig is verzuurd.

Gezien de sorptie-bepaalde vastlegging is voor alle locaties berekend hoeveel de pluim nog kan groeien. Dit blijkt voor 4 van de 7 locaties 10% of minder te zijn, voor 2 locaties circa 50% en voor 1 locatie (diepe pakket) circa 200% en 800% in het ondiepe pakket, zie tabel 3. Voor deze laatste site geldt dat in een ander kader laboratoriumonderzoek naar de sorptie en desorptie is uitgevoerd, waaruit slechts een toename van 20% volgt voor het diepe pakket, maar een toename van 1000% in het ondiepe pakket. Voor het ondiepe pakket zijn de uitkomsten dus vergelijkbaar, maar voor het diepe pakket niet. Dit illustreert dat nader onderzoek, zoals in stap 4 is gepland, altijd moet plaatsvinden. Er kan niet volstaan worden met een beoordeling uitsluitend op basis van modelberekeningen.

Voor de locaties geldt dat meestal alleen gegevens beschikbaar zijn van de opgeloste vracht. In de bodem zal echter ook een hoeveelheid reversibel geadsorbeerd metaal aanwezig zijn. De 'beschikbare' vracht aan metaal is daarom groter dan de opgeloste vracht en de pluimuitbreiding zal daarom groter zijn dan de waarden die in tabel 3 zijn opgenomen. Dit hoeft niet tot een fundamenteel andere beoordeling te leiden. Van de site in Mook is ook de totaal geloosde vracht bekend, die leidt tot een uitbreiding met een factor 2,1 tegen 1,4 op basis van de opgeloste vracht. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de zure pH op een belangrijk deel van de locatie, waardoor de metalen hoofdzakelijk in opgeloste vorm aanwezig zijn. Een dergelijke situatie geldt ook voor de locatie Budel. Voor sites waar de pluimuitbreiding nu op 10% is berekend, zal een beschikbare vracht die bijvoorbeeld vijfmaal zo groot is nog altijd in een toename resulteren die kleiner is dan een factor 2. Wel is duidelijk dat in stap 4 nader onderzoek moet worden gedaan naar de totaal beschikbare vracht op een locatie.

Tabel 3. Toekomstige omvang pluim ten opzichte van huidige omvang.

Locatie	Toename pluim (1)	Bijzonderheden
Nieuw-Buinen	<1,1	-
't Gooi	<1,1	-
Leiden	1,1	-
Apeldoorn	1,6	-
Zeist	1,1	-
Budel	Ondiep 9; diep 3,2 (2)	Ondiep 11; diep 1,2 op basis van labproeven
Mook	1,4	2,1 op basis van totaal geloosde vracht

(1) verhouding toekomstige pluim/huidige pluim

(2) ondiep is tot 20 m –mv, diep is 20-60 m –mv

4.4.2 Stabiliteitsindicator

De beoordeling van de lange termijn stabiliteit van de metaalbinding leidt voor alle sites tot een go. Verzuring door atmosferische depositie speelt geen rol van betekenis. Dit komt enerzijds door de diepte van de verontreinigingen, anderzijds omdat de bodem van de sites met ondiepe verontreinigingen voldoende buffercapaciteit bezit. Voor enkele bronzones geldt overigens dat verzuring in principe wel een negatieve invloed kan hebben, waardoor in de toekomst meer metaal kan uitspoelen. Verder moet op een enkele locatie rekening worden gehouden met zuurlozingen. Het effect hiervan moet in stap 3 of 4 nader worden onderzocht.

Gezien het dominante vastleggingsmechanisme van sorptie heeft een eventuele toekomstige toename van de redoxpotentiaal geen negatief effect.

4.5 Stap 2: Indicatieve beoordeling saneringsalternatieven op basis van kosten-effectiviteit

De uitvoering van stap 2 is bemoeilijkt, omdat voor een aantal sites geen saneringsonderzoeken beschikbaar waren. Daarom moest vaak volstaan worden met een kwalitatieve beoordeling. Desondanks zijn een aantal zaken duidelijk:

1. Op veel sites is de bron van de verontreiniging nog aanwezig. Er moet rekening mee worden gehouden dat (volledige) verwijdering van de bron vaak onhaalbaar is, omdat dit leidt tot extreem hoge kosten en/of sloop van in gebruik zijnde bedrijfscomplexen.
2. Het is in dit onderzoeksstadium meestal onduidelijk of de bron nog nalevert en welke metaalvracht in de toekomst (bijvoorbeeld door wijziging in condities) vrij kan komen. Vooralsnog moet er echter rekening mee worden gehouden dat maatregelen moeten worden getroffen om de bron te isoleren of beheersen (als verwijdering onhaalbaar is).

3. Voor zover kosten bekend zijn is natuurlijke vastlegging steeds verreweg de goedkoopste saneringsvariant. Het is een factor 20 of meer goedkoper dan de multifunctionele variant en een factor 8 goedkoper dan de meest eenvoudige IBC-variant of gestimuleerde vastlegging. NV zal in het algemeen niet als enige techniek toegepast kunnen worden. Voor de aanpak van de pluim zal het echter vrijwel altijd de meest kosteneffectieve methode zijn, voor de sanering van de bron zal een andere methode toegepast moeten worden.
4. Qua milieuverdienste scoort NV vergelijkbaar met of beter dan andere varianten, tenzij ontoelaatbare verspreiding optreedt. Sterke punten van NV zijn dat er geen grondwater onttrokken of gezuiverd moet worden. Daarom treden ook geen negatieve bij-effecten op, zoals productie van afvalstoffen in de vorm van zuiverings-slib of restlozing op oppervlaktewater of riool. Zwakke punten zijn dat de pluim eerst nog een tijd zal groeien en dat NV een langdurig proces is.
5. In het huidige stadium van het onderzoek zijn er nog de nodige onzekerheden omtrent de prestaties van NV, zoals de maximale omvang van de pluim en het verloop van het proces in de tijd. Deze onzekerheden zullen in stap 4 van het BOS geadresseerd worden. Onzekerheden gelden overigens ook voor andere varianten. In de praktijk blijkt dat grondwatersaneringen of beheersingen meestal langer duren dan wordt voorspeld.
6. Hoewel één en ander nog nader moet worden onderzocht is het voor de meeste locaties niet aannemelijk dat binnen 30 jaar een stabiele eindsituatie wordt bereikt. Dit geldt echter ook voor praktisch uitvoerbare alternatieven, die altijd IBC-elementen bevatten.

Samenvattend geldt dat een (kwalitatieve) afweging van saneringsvarianten voor geen enkele locatie tot een no-go leidt. Voor enkele kleine locaties is niet zeker of NV de meest kosteneffectieve methode is. Wel is duidelijk dat NV met name geschikt is voor aanpak van de pluim en dat het op de meeste sites gecombineerd moet worden met maatregelen om de bron te isoleren en beheersen.

4.6 Samenvatting site-beoordelingen

Voor 7 van de 9 onderzochte sites resulteert het doorlopen van de stappen 0-2 van het BOS in een go voor natuurlijke vastlegging. Twee sites vallen in stap 0 af op basis van ontoelaatbare verspreidingsrisico's van de nevenverontreiniging met CKW's. Op deze sites wordt gestimuleerde afbraak van CKW's gecombineerd met gestimuleerde vastlegging van metalen (naast de sites met nevenverontreinigingen is gestimuleerde vastlegging ook denkbaar op sites met een lage pH en ontoelaatbare verspreiding). In stap 1 volgt voor alle resterende sites een go op basis van de haalbaarheid van sorptie-bepaalde vastlegging. Dit betekent dat de pluim eerst nog zal toenemen. Deze toename is vrijwel steeds een factor <2. De lange termijn stabiliteit van de metaalbinding wordt op geen enkele site bedreigd. De afweging van saneringsvarianten in stap 2 is voor de helft van de sites slechts kwalitatief mogelijk, omdat geen saneringsonderzoek is uitgevoerd. Op basis van deze eerste afweging volgt voor de meeste sites een go voor NV als pluimaanpak. Voor enkele sites is het beeld nog onvoldoende duidelijk. Zeker is dat NV op veel sites gecombineerd moet worden met een bronsanering. Dit betekent dat in een volgende stap nader moet worden gekeken naar de huidige en toekomstige emissies vanuit de bron.

Ontbrekende gegevens of onzekerheden zijn niet zodanig dat eerst uitgebreid aanvullend onderzoek moet worden uitgevoerd alvorens verder kan worden gegaan met de volgende stappen van het BOS.

Samenvattend geldt dat NV goede perspectieven heeft als saneringstechniek voor pluimen van metaalverontreinigingen. Een bottleneck kan zijn dat de toekomstige uitbreiding van de pluim ontoelaatbaar is. In dat geval is gestimuleerde vastlegging een alternatief.

HOOFDSTUK 5

EVALUATIE VAN HET BOS

5.1 Inleiding

Zoals beschreven in hoofdstuk 4 zijn 9 sites beoordeeld met een eerste versie van het BOS. In dit hoofdstuk wordt nagegaan of aanpassingen van deze eerste versie noodzakelijk zijn. Hierbij worden de volgende aspecten beoordeeld:

1. Gebruikersvriendelijkheid: is het BOS door onervaren mensen zonder problemen te gebruiken?
2. Beschikbaarheid van gegevens: zijn de benodigde gegevens ook beschikbaar?
3. Juistheid van aannames en uitkomsten.
4. Zinvolheid en volledigheid van de aspecten die in de verschillende stappen beoordeeld worden.

5.2 Gebruikersvriendelijkheid

Om de bruikbaarheid van het BOS te toetsen is door Tauw een interne workshop gehouden, waarbij 5 medewerkers die niet bij de ontwikkeling van het BOS betrokken waren, een site moesten beoordelen. Deze medewerkers hebben wel veel ervaring met bodemonderzoek. Uit de workshop bleek dat de vraagstelling van het BOS duidelijk was. In de spreadsheet bleken enkele termen tot verwarring te leiden. Het gebruik van de stabiliteitsindicator gaf problemen in situaties waar de hoeveelheid Ca-carbonaat onvoldoende was om alle zuur te bufferen. Verder bleek er verschil van inzicht over wat beschouwd moet worden als een bronzone. Deze aspecten zijn aangepast en verduidelijkt. Geconcludeerd wordt dat het BOS goed bruikbaar is voor personen die ervaring hebben met bodemonderzoek.

5.3 Beschikbaarheid van gegevens

In stap 0 konden de toekomstige verspreidingsrisico's van enkele sites niet goed worden beoordeeld, omdat de aanwezigheid van kwetsbare objecten buiten de locatie niet of onvoldoende duidelijk was. Dergelijke informatie is relatief eenvoudig te achterhalen.

Voor stap 1 geldt dat de macrosamenstelling van de vaste fase van diepere aquifers vaak niet (volledig) bekend is. Er is dan volgens plan uitgegaan van de default-waarden voor een 'arme' aquifer. In 5.4 wordt nagegaan of de default-waarden juist zijn.

Voor stap 2 geldt dat vaak geen saneringsonderzoek was uitgevoerd, zodat de afweging van saneringsvarianten een kwalitatief karakter kreeg. Desondanks kan uit deze afweging wel worden afgeleid dat NV perspectief heeft als saneringsmethode voor de pluim.

Geconcludeerd wordt dat er in het algemeen voldoende gegevens beschikbaar zijn voor een eerste kwalitatieve afweging van de haalbaarheid van NV als saneringsvariant. Een punt van discussie is of de afweging van saneringsvarianten in dit stadium meer kwantitatief moet worden onderbouwd of dat hiermee gewacht kan worden tot stap 5. Overweging hierbij is dat varianten met NV pas goed gekwantificeerd kunnen worden na het uitvoeren van stap 4.

5.4 Juistheid van aannames en uitkomsten

In het geval dat samenstellingsgegevens van diepe aquifers ontbreken wordt gewerkt met de volgende default-samenstelling voor een 'arme' aquifer: 1% lutum, 0,4% organische stof, 0,2% Fe/Al-oxide, 0,1% CaCO₃ en 10 mg/l DOC. Voor de metaalbinding zijn de oxiden en organische stof de belangrijkste fasen.

Uit de gegevens blijkt dat ondiepe sites steeds ruimschoots voldoen aan deze samenstelling, ook als er sprake is van een zandgrond. Alleen DOC is vaak hoger dan 10 mg/l. De diepe aquifers voldoen voor zover bekend ook ruimschoots aan de uitgangswaarde voor oxiden, maar niet altijd aan de eis voor lutum en organische stof (hierbij is van belang dat organische stof niet als gloei-verlies is gemeten, maar met andere, meer nauwkeurige methoden). Algemeen geldt dat de samenstelling in stap 4 altijd moet worden geverifieerd en dat rekening moet worden gehouden met variatie in de samenstelling door meerdere monsters te onderzoeken. Het gehalte CaCO₃ is gemiddeld altijd 0,1% of meer. Tenslotte blijkt dat DOC in de diepere aquifers veelal lager is dan 10 mg/l, als geen gegevens beschikbaar zijn kan beter worden uitgegaan van 5 mg/l.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat de uitgangswaarden voor de 'arme' aquifer redelijk zijn. Omdat het gehalte bij de berekeningen eenvoudig gevarieerd kan worden, kan het effect van afwijkende gehalten onderzocht worden door organische stof te variëren tussen 0,1 en 0,4% en oxiden 0,2 en 0,4%.

Een tweede vraag is of de voorspellingen van de vastleggingsindicator overeenkomen met de praktijkwaarnemingen. Hiervoor zijn diverse aanwijzingen:

1. De huidige omvang van de pluim op de locatie Mook komt globaal (factor 0,64) overeen met de voorspelling op basis van de totaal geloosde vracht (dit is al een relatief oude pluim die volgens de berekening nog een factor 1,4-2,1 zal groeien. Op basis van praktijkwaarnemingen is de groei van de pluim in de laatste jaren beperkt).
2. Op andere locaties is de totale input niet bekend maar is de huidige pluimomvang hooguit een factor 10 groter dan het berekende bodemvolume dat nodig is voor vastlegging van de huidige opgeloste vracht. Omdat de totale input aanzienlijk groter zal zijn dan de huidige opgeloste vracht (het grootste deel van de verontreiniging is waarschijnlijk al aan de bodem gebonden), kan geconcludeerd worden dat de orde van grootte van de voorspelling in overeenstemming is met de omvang van de pluim (of in elk geval niet strijdig daarmee).
3. Op enkele kleinere locaties ('t Gooi, Nieuw-Buinen) is al duidelijk waarneembaar dat de concentraties in de tijd dalen.
4. Voor de locatie Budel is er voor het pakket tot 20 m –mv een goede overeenkomst tussen de laboratoriumbepaling van de sorptie en de voorspelling van de vastleggingsindicator. Voor het diepe pakket geeft de laboratoriumbepaling echter een aanzienlijk kleinere pluimomvang dan de vastleggingsindicator (factor 10). Er zijn aanwijzingen dat in het diepe pakket naast sorptie nog andere vastleggingsmechanismen optreden. Nader onderzoek moet dit bevestigen.

De praktijkwaarnemingen zijn dus in grote lijnen in overeenstemming met de voorspellingen van de vastleggingsindicator of ze zijn daar in elk geval niet mee in strijd. In stap 4 zal overigens altijd een verificatie van de modelvoorspelling plaatsvinden.

5.5 Zinvolheid en volledigheid beoordelingen in het BOS

Per stap wordt de vraagstelling van de *eerste versie* geëvalueerd. In de uitgebreide werkwijze, die in bijlage A is beschreven, zijn de resultaten van deze evaluatie volledig verwerkt.

5.5.1 Stap 0

Draagvlak bij probleemhebber, bevoegd gezag en eventuele andere belanghebbenden

Het ligt voor de hand dat de probleemhebber moet instemmen met NV als saneringsoptie. Het lijkt minder zinvol om in dit stadium al overleg te voeren met het bevoegd gezag en andere belanghebbenden aangezien er nog weinig concrete feiten zijn die besproken kunnen worden. NV kan op basis van het beleid niet op voorhand worden uitgesloten als saneringsvariant. Voorgesteld wordt om het overleg met bevoegd gezag en andere belanghebbenden te verschuiven naar

het einde van stap 3. Dit overleg kan tevens worden gebruikt om de onderzoeksstrategie van de vervolgstappen in overeenstemming te brengen met wensen/eisen van het bevoegd gezag.

Omvang en plaats van de verontreiniging en combinatie met andere verontreinigingen

Dit zijn relevante items die gehandhaafd blijven. De vraagstelling kan aangevuld worden met (risico's op) nalevering vanuit de bron, hoewel dit vaak onduidelijk zal zijn.

Huidige verspreiding van de verontreiniging

Dit aspect kan gecombineerd worden met gebruiksbepalingen tot "Huidige verspreiding van de verontreiniging en gebruiksbepalingen van de verontreinigde aquifer".

Toekomstige verspreiding van de verontreiniging

Zie vorige.

Uitvoering van werken die de grondwaterstroming, -stand of kwaliteit beïnvloeden

Effecten van de grondwaterkwaliteit of -stand zullen in dit stadium nog niet duidelijk zijn. Hiervoor is inzicht nodig in het vastleggingsmechanisme, de nalevering vanuit de bron en de wijze waarop met de bron zal worden omgegaan. Voorgesteld wordt om de beoordeling te beperken tot werken die de grondwaterstroming beïnvloeden. Het zal daarbij met name gaan om nieuwe, eventueel tijdelijke, onttrekkingen, zoals omvangrijke bemalingen van bouwputten. De andere aspecten kunnen bij de stabiliteitsindicator (waterkwaliteit) en de afweging van saneringsvarianten (bronmaatregelen) aan de orde komen.

5.5.2 Stap 1

Vastleggingsindicator, inclusief berekening benodigd aquifervolume

De opzet en vraagstelling voldoen. Omdat vaak gegevens over de beschikbare vracht ontbreken dient toegevoegd te worden dat de berekening van het aquifervolume bij sorptie-bepaalde vastlegging zowel voor de opgeloste vracht als voor een vracht die een factor 5-100 hoger is moet worden uitgevoerd. Indien de macrosamenstelling van de aquifer onvoldoende bekend is, dient het effect van variaties in de samenstelling doorgerekend te worden.

Stabiliteitsindicator

Deze beoordeling kan vereenvoudigd worden bij sorptie-bepaalde vastlegging en een diepte van de aquifer van meer dan 2 m. Aandacht voor verzuring blijft wel belangrijk als de toplaag geen kalk bevat of er sprake is van zuurlozingen, etc.

5.5.3 Stap 2

Aangezien vaak geen saneringsonderzoek is uitgevoerd is het lang niet altijd mogelijk om een kwantitatieve afweging te maken van de saneringsvarianten. Bovendien kan NV nog niet volledig worden beoordeeld, omdat nog nader onderzoek moet worden uitgevoerd in stap 4. Voorgesteld wordt om de afweging van de saneringsvarianten in stap 2 een meer kwalitatief karakter te geven (zeker indien geen saneringsonderzoek is uitgevoerd). Wel blijft het uitgangspunt dat in stap 2 het volgende duidelijk moet worden:

- a) Welke saneringsvarianten met NV perspectief hebben (enkel NV, NV met bronmaatregelen, aard bronmaatregelen).
- b) Of de saneringsvarianten met NV uit oogpunt van kosteneffectiviteit naar verwachting als beste scoren, bij acceptabele risico's.

5.5.4 Aanvullend onderzoek

In de eerste versie van het BOS is een stap 1A opgenomen voor nader technisch onderzoek. Uit de site-beoordelingen blijkt dat dit onderzoek in geen enkel geval noodzakelijk was. Daarentegen waren er wel enkele onzekere situaties in stap 0 en stap 2. Daarom wordt voorgesteld om de huidige stap 1A te vervangen door een nieuwe stap 3, waarin alle resterende vragen uit de stap-

pen 0-2 aan de orde komen. Tevens vindt in deze stap overleg plaats met het bevoegd gezag en met eventuele andere belanghebbenden.

5.5.5 *Belang informatie voor andere saneringsvarianten*

Hoewel het BOS primair uitgaat van de beoordeling van natuurlijke vastlegging, wordt ook belangrijke informatie verkregen voor de beoordeling van gestimuleerde vastlegging. Dit betreft de doorlatendheid van de bodem, de bodemopbouw en de pH- en redoxcondities. Op basis hiervan kunnen concrete technieken worden beoordeeld. De haalbaarheid van saneringsvarianten, zoals uitspoelen of het gebruik van reactieve barrières, kan slechts zeer globaal worden beoordeeld. Condities, zoals de doorlatendheid van de bodem, de bodemopbouw en de pH, zijn echter ook voor deze technieken van groot belang.

5.5.6 *Samenvatting*

Op basis van de ervaringen die zijn opgedaan wordt voorgesteld om de stappen 0-2 in een aantal opzichten te vereenvoudigen. Met name stap 2 krijgt een meer kwalitatief karakter. Het geheel van de stappen 0-2 bestaat dan uit een indicatieve beoordeling van de haalbaarheid van vastlegging, die met minimale onderzoeksinspanning kan worden uitgevoerd. Toegevoegd wordt een stap 3, waarin essentiële ontbrekende gegevens verkregen moeten worden en waarin overleg plaatsvindt met het bevoegd gezag en eventuele andere belanghebbenden. Op basis hiervan wordt de onderzoeksstrategie voor de vervolgstappen definitief gemaakt. Deze vervolgstappen bestaan uit stap 4, waarin de technische haalbaarheid van NV wordt onderzocht en stap 5, waarin de saneringsvarianten kwantitatief worden beoordeeld.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Het BOS

Fase 1 van het BOS is in grote lijnen volgens plan ontwikkeld. Uit de beoordeling van 9 sites blijkt dat het BOS hanteerbaar is voor personen die ervaring hebben met bodemonderzoek. De uitkomsten zijn bruikbaar en een aantal praktijkgegevens bevestigt in grote lijnen de theoretische voorspellingen van de vastleggingsindicator. Ontbrekende gegevens of onzekerheden zijn niet zodanig dat eerst uitgebreid aanvullend onderzoek moet worden uitgevoerd alvorens verder kan worden gegaan met de volgende stappen van het BOS. De beoordelingen in de stappen 0-2 kunnen in een aantal opzichten vereenvoudigd worden (zie aanbevelingen).

Site-beoordelingen

Voor 7 van de 9 onderzochte sites resulteert het doorlopen van de stappen 0-2 van het BOS in een go voor natuurlijke vastlegging. Twee sites vallen in stap 0 af op basis van ontoelaatbare verspreidingsrisico's van de nevenverontreiniging met CKW's. Op deze sites wordt gestimuleerde afbraak van CKW's gecombineerd met gestimuleerde vastlegging van metalen. In stap 1 volgt voor alle resterende sites een go op basis van de haalbaarheid van sorptie-bepaalde vastlegging. Dit betekent dat de pluim eerst nog zal toenemen. Deze toename is vrijwel steeds een factor <2. De lange termijn stabiliteit van de metaalbinding wordt op geen enkele site bedreigd. De afweging van saneringsvarianten in stap 2 is voor de helft van de sites slechts kwalitatief mogelijk omdat geen saneringsonderzoek is uitgevoerd. Op basis van deze eerste afweging is NV op de meeste sites waarschijnlijk de meest kosteneffectieve methode voor sanering van de pluim. Voor enkele sites is dit nog onduidelijk. Zeker is dat NV op veel sites gecombineerd moet worden met een bronsanering. Dit betekent dat in een volgende stap nader moet worden gekeken naar de huidige en toekomstige emissie vanuit de bron.

Natuurlijke vastlegging

Uit de indicatieve beoordelingen blijkt dat NV op de meeste sites perspectief heeft als saneringsmethode voor de pluim. De pluim zal meestal eerst nog groeien en dit kan een bottleneck vormen voor de praktijktoepassing. In dergelijke situaties kan gestimuleerde vastlegging een alternatief vormen.

Gestimuleerde vastlegging

Gestimuleerde vastlegging heeft perspectief op sites waar de afbraak van de nevenverontreiniging CKW's gestimuleerd wordt door substraatinjectie en verder op locaties waar de actuele of toekomstige verspreiding onacceptabel is. Op de sites die in dit project zijn beoordeeld, is nog onzeker of de toekomstige verspreiding in alle gevallen door het bevoegd gezag geaccepteerd zal worden. Gezien de bodemopbouw is het op bijna alle onderzochte sites technisch mogelijk om substraten in de bodem te brengen.

Relatie BOS met fasering bodemonderzoek

De stappen 0-3 van het BOS worden normaliter doorlopen als het nader bodemonderzoek is uitgevoerd. Deze indicatieve beoordeling kan worden gezien als een voorbereiding op het saneringsonderzoek. De vervolgstappen 4-5 kunnen het beste gecombineerd worden met het uitvoeren van het saneringsonderzoek.

Als het saneringsonderzoek al is uitgevoerd (zonder de variant natuurlijke of gestimuleerde vastlegging) kan de beoordeling van stap 2 een kwantitatief karakter krijgen en hoeft in stap 5 alleen

aanvullende informatie te worden verwerkt. De uitvoering van de andere stappen blijft inhoudelijk gelijk.

Samenvatting

- De stappen 0-3 van het BOS zijn ontwikkeld en resulteren in een indicatieve beoordeling van de haalbaarheid van vastlegging ten opzichte van andere varianten. Als de resultaten van nader bodemonderzoek bekend zijn kan deze beoordeling worden uitgevoerd door een beperkt aanvullend onderzoek.
- NV heeft goede perspectieven als saneringstechniek voor pluimen van metaalverontreinigingen. In situaties dat de verspreiding van de metalen of een nevenverontreiniging (CKW's) niet acceptabel is, biedt gestimuleerde vastlegging perspectief.
- Gezien de positieve resultaten is verdere ontwikkeling van het BOS zinvol.

6.2 Aanbevelingen

Aanpassingen stappen 0-2 eerste versie BOS

Voorgesteld wordt om de stappen 0-2 in een aantal opzichten te vereenvoudigen en stap 2 een meer kwalitatief karakter te geven. Het geheel van de stappen 0-2 bestaat dan uit een indicatieve beoordeling van de haalbaarheid van vastlegging, die met minimale onderzoeksinspanning kan worden uitgevoerd. Toegevoegd wordt een stap 3, waarin essentiële ontbrekende gegevens verkregen moeten worden en waarin overleg plaatsvindt met het bevoegd gezag en eventuele andere belanghebbenden. Op basis hiervan wordt de onderzoeksstrategie voor de vervolgstappen definitief gemaakt. Deze vervolgstappen bestaan uit stap 4, waarin de technische haalbaarheid van NV wordt onderzocht, en stap 5, waarin de saneringsvarianten kwantitatief worden beoordeeld. De genoemde aanpassing van de stappen 0-3 is al doorgevoerd in de uitgebreide beschrijving van het BOS in bijlage A.

Verdere ontwikkeling BOS

Gezien de resultaten van fase 1 wordt aanbevolen om de ontbrekende stappen van het BOS te ontwikkelen. Hierbij moeten de volgende technische aspecten aan de orde komen:

- a) Bepaling van de huidige en toekomstige nalevering vanuit de bron;
- b) Bepaling van de 'beschikbare' vracht die al in de bodem aanwezig is;
- c) Verificatie van de bindingscapaciteit van de bodem;
- d) Verificatie van de bindingsmechanismen van de metalen aan de bodem. Op basis hiervan nagaan of de toekomstige stabiliteit gewaarborgd is;
- e) Ruimtelijke verspreiding van de verontreiniging;
- f) Bepaling toekomstige pluimomvang door modellering van het transport en de vastlegging van de metalen. Een alternatief is evaluatie van langdurige monitoringsgegevens.

Bij de beschouwing van de saneringsvarianten moet (voor zover relevant) worden uitgegaan van een totaal-aanpak van de bron en de pluim.

Overige aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de praktijkervaringen die met vastlegging worden opgedaan en met het gebruik van het BOS op termijn te evalueren en deze ervaringen te verwerken in het BOS. Verder is het zinvol om de methoden waarmee vastlegging gestimuleerd kan worden uit te werken en het BOS uit te breiden met stappen die de selectie van optimale methode(n) voor gestimuleerde vastlegging ondersteunen.

LITERATUUR

1. Sinke, A.J.C. e.a. (1998): Beslissingsondersteunend model natuurlijke afbraak. NOBIS rapport 97-1-02, CUR, Gouda.
2. Tauw (2000): Definitiestudie ten behoeve van een beslissingsondersteunend model voor de vastlegging van zware metalen in de verzadigde zone. Rapport R001-3817687IHS-C02-D, Tauw, Deventer.
3. J.J. Dijkstra en R.N.J. Comans (2003): Ontwikkeling van de vastleggingsindicator en de stabiliteitsindicator. Rapportnr. ECN-C—03-004, ECN, Petten. Rapport is aanwezig op bijgevoegde CD-ROM.
4. Tauw (2002): Toepassing beslissingsondersteunend model voor de bepaling van vastlegging van zware metalen op praktijklocaties. Rapport R004-3897036RCT-D01-D, Tauw, Deventer.
5. Drunen, van M.A. e.a. (2001): De RMK-methodiek voor het beoordelen van bodemsaneringsvarianten, NOBIS rapport 95-1-03, CUR, Gouda.
6. BEVER (1999): Van trechter naar Zeef, SDU, Den Haag.
7. Stubo (2001): Afwegingsproces voor de aanpak van mobiele verontreinigingen in de ondergrond, Den Haag.

BIJLAGE A

GEDETAILLEERDE WERKWIJZE BOS ZWARE METALEN

1 Stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging

1.1 Algemeen

In het onderstaande kader is de inhoud van stap 0 in hoofdlijnen weergegeven.

Stap 0: Verkenning mogelijkheden voor vastlegging

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van deze stap is om de perspectieven voor vastlegging te beoordelen op basis van een omgevingstoets (bijvoorbeeld onttrekkingen, gebruiksbependingen), draagvlak bij de betrokkenen en een eerste beschouwing van de verontreinigingssituatie. Stap 0 leidt tot een eerste go/no go beslissing omtrent natuurlijke vastlegging, bij een positief oordeel wordt verdergegaan naar stap 1. Bij een negatief oordeel wordt nagegaan of gestimuleerde vastlegging een alternatief vormt.

Achtergrond

Op basis van aanwezigheid of eenvoudig te verkrijgen informatie is het al in een vroeg stadium mogelijk om vastlegging als saneringsalternatief in bepaalde gevallen uit te sluiten.

Benodigde informatie

Nader bodemonderzoek, bestemmingsplan (eventueel streekplan), standpunten probleemeigenaar en eventuele andere direct betrokkenen.

Werkwijze

Er wordt informatie geëvalueerd betreffende de aard en omvang van de verontreiniging, de geohydrologische situatie en risico's van de verontreiniging in relatie tot het gebruik van de locatie en de directe omgeving. Daarnaast wordt informatie verzameld over het toekomstige gebruik van de locatie en de directe omgeving. Tevens wordt met de betrokkenen overlegd over het draagvlak voor vastlegging. Vervolgens wordt een eerste toetsing uitgevoerd, zodat kan worden vastgesteld of vastlegging van zware metalen in potentie een reële saneringsvariant is uit het oogpunt van bodembeheer, bodemkwaliteit en toekomstige ontwikkelingen op en rond de locatie. Als daar aanleiding voor is, wordt ook overleg gevoerd met het bevoegd gezag.

1.2 Werkwijze

Draagvlak

Om in te schatten of er voldoende draagvlak aanwezig is voor vastlegging van zware metalen vindt er overleg plaats met de eigenaar van de locatie en eventuele andere direct betrokkenen, bijvoorbeeld eigenaren van percelen waaronder de verontreiniging zich heeft verspreid. In deze gesprekken moet in elk geval aan de orde komen dat natuurlijke vastlegging een traag verlopend proces is, zodat een sanering volgens dit principe tientallen jaren in beslag kan nemen (overigens geldt dit ook voor veel grondwaterbeheersingen). In veel gevallen zal de verontreinigingspluim eerst nog toenemen. Dit kan een nadeel geven bij verkoop van het bedrijf of beperkingen opleggen aan het toekomstige gebruik van de ondergrond. De genoemde nadelen gelden niet of in mindere mate bij gestimuleerde vastlegging. Overleg met het betrokken bevoegd gezag kan in dit stadium zinvol zijn als er twijfels zijn over de acceptatie van vastlegging als beheersingsvariant. Hierbij is van belang hoe het bevoegd gezag invulling geeft aan het begrip stabiele eindsituatie. Als er geen reden is om op voorhand te twijfelen aan de instemming van het bevoegd gezag, kan het overleg beter plaatsvinden in stap 3. Er is dan meer concrete informatie beschikbaar. Dit geldt ook voor overleg met andere betrokkenen.

Locatie-informatie

In deze stap van het BOS wordt nog geen veldonderzoek uitgevoerd. Wel is van belang dat de gegevens van het nader bodemonderzoek voldoende geschikt zijn voor een eerste beoordeling ten aanzien van de vastlegging van zware metalen. Er moet worden nagegaan of bij de reeds uitgevoerde bodemonderzoeken macroparameters en redoxcondities zijn bepaald. Dit kan leiden tot een aanbeveling om aanvullend veldwerk uit te voeren voor het doorlopen van stap 1.

Uit het eerder uitgevoerde bodemonderzoek wordt de volgende informatie verkregen:

- De historie, aard en omvang van de verontreiniging (inclusief verdeling over een eventueel nog aanwezige bron en de pluim; zo mogelijk informatie over de mate waarin de bron nog nalevert);
- Activiteiten op en rond de locatie;
- Grondwateronttrekkingen op en rond de locatie;
- De bodemopbouw en de macrosamenstelling van de grond;
- De geohydrologische situatie;
- De macrochemie van het grondwater (pH, E.C., indien bekend de redoxpotentiaal en de concentraties van componenten als Fe, DOC, SO₄);
- Toxicologische risico's.

Omgevingstoets

Om te beoordelen of zich kwetsbare objecten of functies in de nabijheid bevinden dient een omgevingstoets te worden uitgevoerd. Het gaat hierbij zowel om de huidige als de toekomstige bestemmingen en gebruiksvormen. Het ontwikkelpotentieel van de locatie mag niet onmogelijk worden. De volgende aspecten moeten worden meegewogen:

1. Afstand van de verontreiniging tot de huidige of te voorziene toekomstige grondwateronttrekkingen.
2. Kan het grondwater (eventueel via kwel) kwetsbare objecten bereiken als oppervlaktewater, veedrenkputten.
3. Vinden in de directe omgeving van de locatie bouwprojecten met bemaling plaats.
4. Krijgt de locatie zelf of de omgeving van de locatie een andere bestemming, die van invloed kan zijn op de grondwaterstand of -stroming.

Toekomstige verspreiding

Naast de huidige verspreiding van de verontreiniging is het van belang om een eerste schatting te maken van de verspreiding in de toekomst. In deze stap wordt dit indicatief gedaan, in latere stappen wordt dit aspect gekwantificeerd. Indicatieve schattingen kunnen als volgt worden uitgevoerd, waarbij de eerste mogelijkheid de voorkeur heeft:

- Lineaire extrapolatie van de verspreidingsnelheid, zoals die kan worden afgeleid uit de verspreiding vanaf het begintijdstip (ontstaan verontreiniging) tot het tijdstip van het laatste bodemonderzoek.
- Verspreiding op basis van de uit eerder onderzoek bekende grondwatersnelheid. Hierbij wordt een retardatie van 1 aangehouden indien hier verder niets over bekend is. De snelheid van de verontreiniging is dan gelijk aan de snelheid van het water. Vaak geldt voor metalen dat ze veel langzamer door de bodem bewegen dan het grondwater maar dit is sterk pH-afhankelijk. Vanzelfsprekend moet dit aspect in volgende stappen nader worden onderzocht.
- Verspreiding op basis van een schatting van de grondwatersnelheid. Hiervoor worden de waarden in tabel A1. aangehouden.

Tabel A1. Indicatie grondwatersnelheden bij verschillende bodemtypen.

Bodemtype:	Homogeen goed doorlatend zand	Zand met slecht doorlatende laagjes	Slecht doorlatend met zandlaagjes	Slecht doorlatend (klei, leem, veen)
Indicatie grondwatersnelheid (m/j)	30 (10-50)	10 (1-10)	1 (0,1-1)	0,1 (0,01-0,1)

NB: Naast deze benadering, die een indruk geeft van de maximale verspreiding in een bepaalde tijdsperiode, geeft het resultaat van stap 1 een indicatie van de maximale omvang van de pluim. Het resultaat van stap 1 moet worden vergeleken met deze uitkomst.

Gebruiksbeperkingen

Omdat de verontreiniging in de bodem achterblijft, kan deze methode tot gebruiksbeperkingen leiden. Dit geldt dan voor het gebruik/de onttrekking van grondwater dat in of nabij de pluim aanwezig is en werkzaamheden die een aanzienlijke negatieve invloed hebben op de grondwaterstroming (de verspreiding van de verontreiniging neemt sterk toe) of de stand van het grondwater (bijvoorbeeld omvangrijke bemalingen). Het effect van fluctuaties in de grondwaterstand is niet per definitie negatief en is mede afhankelijk van het vastleggings-mechanisme en de verspreiding van de verontreiniging. Deze aspecten zijn in dit stadium mogelijk nog onbekend, zodat de beoordeling hiervan doorgeschoven moet worden naar stap 1.

Aangezien de verontreiniging zich als een pluim in het watervoerend pakket bevindt, gelden er geen gebruiksbeperkingen voor de toplaag van de grond. Dit geldt uiteraard niet als zich in de toplaag ook verontreinigingen bevinden (bronzone). Verder is het denkbaar dat ingrijpende wijzigingen in het locatiegebruik leiden tot andere condities in het grondwater of veranderingen in de grondwaterstand.

Dit is in de praktijk waarschijnlijk uitzonderlijk, maar als daar aanleiding voor is dienen de consequenties hiervan in stap 3 of 4 nader te worden onderzocht.

Onttrekking van grondwater of bemaling op eigen terrein is in principe niet strijdig met vastlegging van metalen. Wel is duidelijk dat de onttrekking van grondwater uit of nabij de verontreinigingspluim voor gebruik als drinkwater of beregeningswater niet mogelijk is. Dit geldt dan voor de tijdsduur van de sanering. Na afloop van de sanering zijn kleinschalige onttrekkingen, die niet leiden tot een belangrijke verandering van de bodemcondities, in principe weer mogelijk.

Eén en ander is afhankelijk van de uiteindelijke kwaliteit van het grondwater en de eisen die aan het water worden gesteld. In hoeverre aan grootschalige onttrekkingen beperkingen opgelegd moeten worden is afhankelijk van de stabiliteit van de bodemcondities en de metaalverbindingen. Dit aspect komt in stap 1 en stap 4 aan de orde.

1.3 Go-no-go criteria fase 0 voor natuurlijke vastlegging

1. Draagvlak bij betrokkenen²

Go: de eigenaar, het betrokken bevoegd gezag en andere direct betrokkenen staan open voor een eventuele toepassing van deze saneringsoptie.

No-go: er is geen draagvlak bij de eigenaar van de locatie en/of het betrokken bevoegd gezag en/of andere direct betrokkenen, waarvan de instemming essentieel is.

Nader onderzoek: een deel van de direct betrokkenen wijst vastlegging af, anderen staan er wel voor open. Nagaan of er tot overeenstemming kan worden gekomen, bijvoorbeeld door het geven van garanties (bijvoorbeeld faalscenario) of schadevergoeding.

2. Omvang en plaats van de verontreiniging

Go: (1) er is geen bronzone aanwezig. (2) Er is geen noodzaak of mogelijkheid om de aanwezige bron te saneren. (3) Er moet wel een bronsanering worden uitgevoerd, maar de pluim is van een zodanige omvang dat deze niet eenvoudig met de bronsanering verwijderd kan worden.

No-go: er is een aanzienlijke verontreiniging in de vaste fase van de bodem aanwezig (bronzone) die verwijderd moet worden en de verontreiniging in het grondwater (pluim) is zodanig beperkt van omvang dat deze eenvoudig met de grondsanering kan worden meegenomen.

Nader onderzoek: (1) er is sprake van een beperkte omvang van de verontreiniging van het grondwater in relatie tot de verontreiniging van de grond, terwijl nog onduidelijk is of de grond gesaneerd zal worden (uitvoeren in stap 2 of stap 5). (2) Er is sprake van een beperkte omvang van de verontreiniging van het grondwater, echter het is niet zondermeer duidelijk dat natuurlijke of gestimuleerde vastlegging op deze locatie niet kosteneffectief is (uitvoeren in stap 2).

3. Combinatie met andere verontreinigingen

Go: er zijn geen andere verontreinigingen aanwezig of andere verontreinigingen kunnen door natuurlijke of gestimuleerde afbraak verwijderd worden.

No-go: er zijn andere verontreinigingen aanwezig die uitsluitend door onttrekking verwijderd kunnen worden.

Nader onderzoek: de risico's en/of afbreekbaarheid van andere verontreinigingen zijn onvoldoende duidelijk (uitvoeren in stap 0 door literatuuronderzoek).

4. Huidige verspreiding van de verontreiniging en gebruiksbepalingen

Go: de verontreiniging heeft geen kwetsbare objecten bereikt en vormt geen risico voor mens, vee of natuur. Gebruiksbepalingen vormen voor de huidige omvang van de verontreiniging geen probleem.

No-go: de verontreiniging heeft al kwetsbare objecten bereikt en vormt een risico voor mens, vee of natuur en/of de gebruiksbepalingen zijn onacceptabel.

Nader onderzoek: de risico's zijn niet of onvoldoende in kaart gebracht (uitvoeren in stap 0).

5. Verspreiding over 30 jaar en toekomstige gebruiksbepalingen

Go: de verontreiniging kan ook onder worst case aannamen binnen 30 jaar geen kwetsbare objecten bereiken en er zullen geen onoverkomelijke gebruiksbepalingen ontstaan.

No-go: de verontreiniging zal zeker binnen 30 jaar kwetsbare objecten bereiken en/of er ontstaan onacceptabele gebruiksbepalingen.

² Overleg met het bevoegd gezag vindt alleen plaats als er aanleiding is om dit in een vroeg stadium te doen, anders vindt dit plaats in stap 3. Dit geldt ook voor overleg met andere betrokkenen.

Nader onderzoek: de toekomstige verspreiding en/of gebruiksbepalingen van de verontreiniging zijn onvoldoende duidelijk, risico's zijn niet uit te sluiten (in elk geval vastlegging toetsen in stap 1, eventueel grondwatersnelheid of retardatiefactor bepalen in stap 1).

6. Uitvoering van werken die de grondwaterstroming beïnvloeden

Go: er zijn geen indicaties dat zodanig omvangrijke werken uitgevoerd zullen worden dat de verspreiding van de verontreiniging hierdoor belangrijk zal worden beïnvloed.

No-go: er zijn bouwplannen of andere maatregelen bekend die zullen leiden tot zodanige beïnvloeding van de grondwaterstroming dat er sprake zal zijn van ongewenste verspreiding (NB: een bemaling op eigen terrein wordt niet als ongewenst beschouwd. Deze zal resulteren in verwijdering van een deel van de verontreiniging en wellicht in een vermindering van de verspreiding).

Nader onderzoek: er is onzekerheid over de uitvoering van werken die de grondwaterstroming kunnen beïnvloeden of de consequenties van dergelijke werken (uitvoeren in stap 0 of 1 door overleg met betrokkenen).

In complexe en/of omvangrijke verontreinigingssituaties is het op voorhand niet uit te sluiten dat natuurlijke vastlegging een deeloplossing kan zijn als deze aanpak op basis van draagvlak of huidige verspreiding voor de locatie *als geheel* afvalt.

1.4 Go-no-go criteria fase 0 voor gestimuleerde vastlegging

De in 1.3 genoemde criteria gelden in hoofdzaak ook voor gestimuleerde vastlegging. De volgende aspecten worden anders beoordeeld:

5. Verspreiding over 30 jaar en toekomstige gebruiksbepalingen

Voor de toekomstige verspreiding en gebruiksbepalingen geldt dat het gebied waarin problemen kunnen ontstaan sterk kan worden beperkt. Door toepassing van gestimuleerde vastlegging kunnen verontreinigingen in principe binnen één tot enkele jaren worden vastgelegd, waardoor bedreigingen afgewend kunnen worden. Een no-go geldt dan alleen nog als de verontreiniging binnen de uitvoeringsperiode van de sanering (bijvoorbeeld 3 jaar) een kwetsbaar object kan bereiken.

6. Uitvoering van werken die de grondwaterstroming beïnvloeden

Voor de uitvoering van werken geldt dat de invloed van toekomstige grondwateronttrekkingen afgewend kan worden als met gestimuleerde vastlegging de metalen op tijd geïmmobiliseerd worden. Aanvullend geldt dan ook de voorwaarde van chemische stabiliteit, zie hiervoor stap 1.2.

In complexe en/of omvangrijke verontreinigingssituaties is het op voorhand niet uit te sluiten dat gestimuleerde vastlegging een deeloplossing kan zijn als deze aanpak op basis van draagvlak of huidige verspreiding voor de locatie *als geheel* afvalt.

In deze stap vindt nog geen beoordeling plaats van de technische mogelijkheden om metalen vast te leggen. Ongunstige condities, zoals een zure pH, sluiten bepaalde vormen van gestimuleerde vastlegging niet uit.

2 **Stap 1.1: Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid van vastlegging met behulp van de vastleggingsindicator**

2.1 **Algemeen**

In onderstaand kader is de inhoud van stap 1.1 in hoofdlijnen weergegeven.

Stap 1.1 Indicatieve beoordeling technische haalbaarheid van vastlegging met behulp van de vastleggingsindicator

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 1.1 is om een kwalitatieve tot semi-kwantitatieve beoordeling uit te voeren van de vastleggingscapaciteit van de bodem. Het resultaat is dat een indruk wordt verkregen van de vastleggingscapaciteit en de toekomstige verspreiding van de verontreiniging. Het resultaat is een go-no-go beslissing of een aanbeveling tot nader onderzoek. Bij een no-go beslissing kan gestimuleerde vastlegging als alternatief worden overwogen.

Achtergrond

Metalen kunnen in de bodem worden vastgelegd door precipitatie van onoplosbare verbindingen of door binding aan de matrix (sorptie). Dergelijke reacties zijn te voorspellen indien de samenstelling van het grondwater en de bodem bekend zijn. Bij de ontwikkeling van de vastleggingsindicator is uitgegaan van een gemiddelde grondwatersamenstelling en een 'arme', zandige bodem. Deze condities zijn zodanig gekozen dat naar verwachting de meeste locaties een vergelijkbare of hogere bindingscapaciteit bezitten. Deze benadering leidt tot een eerste, indicatieve beoordeling van de kansrijkheid van vastlegging op een bepaalde locatie. Hiermee wordt voorkomen dat uitgebreid onderzoek wordt uitgevoerd op locaties waar vastlegging geen perspectief heeft. Bij een positieve beoordeling dient nog wel een verificatie plaats te vinden in stap 4 van het BOS.

Benodigde gegevens

pH, redoxpotentiaal en macrosamenstelling van het grondwater (minimaal ijzer, sulfaat, (bi)carbonaat, DOC). Macrosamenstelling van de bodem: organische stof, lutum en gehalte aan ijzer- en aluminiumoxiden. Eventueel kan eerst met default-waarden van de macro-samenstelling worden gerekend. Concentraties en schatting van de vrachten aan verontreinigingen.

Werkwijze

Er wordt uitgegaan van reeds beschikbare informatie, zonodig aangevuld met bepaling van de redoxcondities en macrocomponenten in het grondwater en de bodemsamenstelling. Voor de meest voorkomende metalen zijn pH/redoxdiagrammen geconstrueerd, met daarin drie gebieden: vastlegging is kansrijk (groen), onzeker (oranje) of onwaarschijnlijk (rood). De verkregen pH en redoxpotentiaal worden in deze diagrammen projecteerd. Verder wordt een schatting gemaakt van het bodemvolume dat nodig is om de mobiele vracht aan metalen te binden indien sorptie het bepalende proces is. Hieruit kan worden afgeleid in welke mate de pluim zich nog kan uitbreiden. Indien beide toetsingen tot een positief resultaat leiden wordt doorgegaan met stap 1.2. Bij een onzeker resultaat wordt nader onderzoek uitgevoerd. Bij een negatief resultaat worden de mogelijkheden voor gestimuleerde vastlegging nagegaan. De berekeningen kunnen worden uitgevoerd met een Excel-bestand, dat op CD-ROM is bijgevoegd als bijlage D.

2.2 Achtergrond

Voor een volledige beschrijving van de wijze waarop de stabiliteitsindicator is ontwikkeld wordt verwezen naar het ECN-rapport [3], dat als PDF-bestand aanwezig is op de bijgevoegde CD-ROM. Navolgend wordt een samenvatting gegeven.

Voor de metalen zink, cadmium, chroom, koper en nikkel en voor het metalloïd arseen zijn pH/redoxdiagrammen geconstrueerd. Als voorbeeld wordt in figuur A1 het diagram van zink gepresenteerd, de overige diagrammen staan in bijlage B. De diagrammen zijn zo geconstrueerd, dat de groene zones de begrenzing vormen van de T-waarde van het metaal in oplossing, zie bijvoorbeeld het diagram van zink in figuur A1. In de groene zones kan vastlegging plaatsvinden door precipitatie van slecht oplosbare verbindingen, zoals zinksulfide (ZnS) bij lage redoxpotentiaal, zink(hydr)oxides bij licht alkalische pH en gematigde redoxpotentiaal, of adsorptie aan reactieve deeltjes in de vaste matrix van de bodem (zoals ijzeroxide, organische stof, klei). In het oranje gebied kan in theorie vastlegging plaatsvinden, maar dat is bijvoorbeeld afhankelijk van de werkelijke concentratie van de anionen die de precipitaten vormen (sulfaat, carbonaat e.a.) of de werkelijke gehalten aan adsorberende bestanddelen in de bodem (oxiden, organische stof, lutum). De gehalten van deze parameters moeten dan geverifieerd worden.

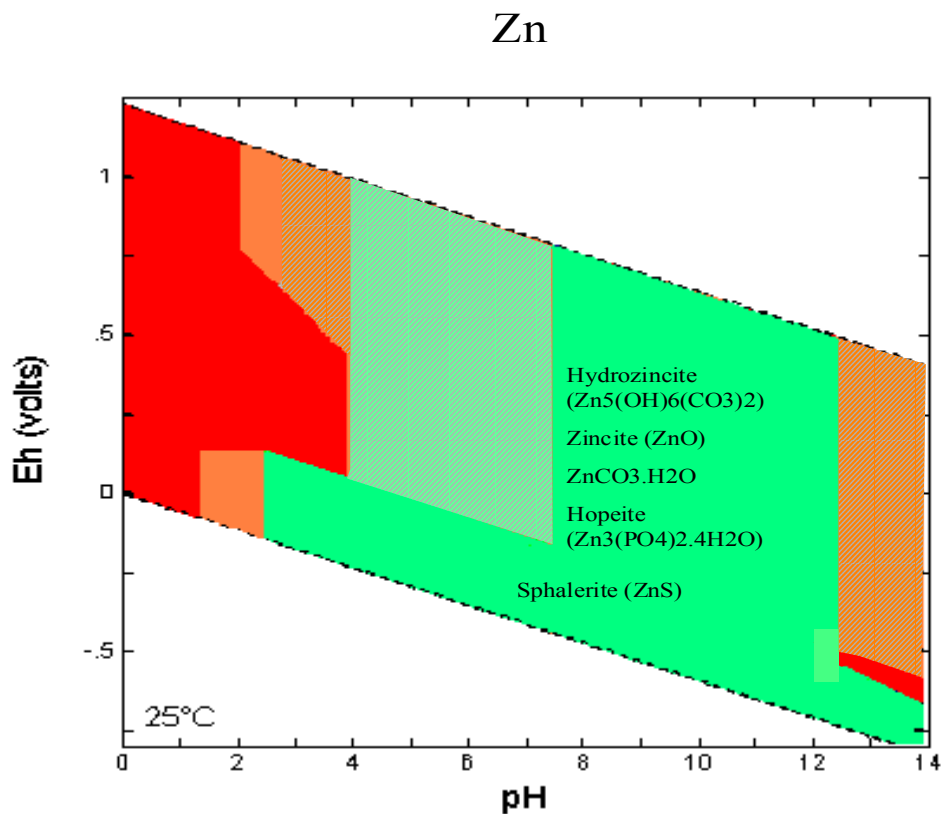


Fig. A1. Vastleggingsindicator voor Zn. Groen = vastlegging is waarschijnlijk; oranje = vastlegging in onzeker; rood: vastlegging is onwaarschijnlijk.

In de diagrammen zijn delen van de groene en oranje vlakken gearceerd. Voor deze delen geldt dat de vastlegging bepaald wordt door **sorptie**. In dat geval kan de bodem weliswaar metalen vastleggen tot de T-waarde voor grondwater maar is het nog niet zeker dat vastlegging acceptabel is. Dit is namelijk ook afhankelijk van de 'beschikbare' vracht aan metaal (dat is de som van de hoeveelheid metaal in oplossing en dat deel van de verontreiniging dat reversibel aan de bodem is gebonden en dus weer kan vrijkomen). Indien de beschikbare metaalvracht groot is, zal de verontreiniging zich bij een gegeven bindingscapaciteit verder verspreiden dan bij een kleinere vracht.

Precipitatie is volledig gebaseerd op de condities in het grondwater en de stabiliteit van mineralen en daarmee onafhankelijk van de bindingscapaciteit van de vaste fase. Wanneer precipitatie bepalend is, hoeft daarom in principe geen verspreidingsberekening te worden uitgevoerd. Wel is het denkbaar dat de precipitatie traag of onvolledig verloopt, omdat het systeem niet in evenwicht is (bijvoorbeeld door een trage kinetiek of door limitatie van de C-bron bij sulfideprecipitatie).

De belangrijkste uitgangspunten bij het construeren van de pH/redoxdiagrammen zijn:

- Er wordt uitgegaan van chemisch evenwicht.
- Wat macrocomponenten betreft wordt de gemiddelde grondwatersamenstelling in Nederland aangehouden, echter voor de belangrijke anionen sulfaat en (bi)carbonaat, waarmee metalen precipitaten kunnen vormen, is bij het construeren van de oranje velden rekening gehouden met de mogelijke variaties in het Nederlandse grondwater (zie tabel A2). De samenstelling van het grondwater wordt (per uitgangssituatie) constant verondersteld in de beschouwde range van pH en Eh.
- Berekend worden de velden waarbij mineralen de oplosbaarheid van een metaal onder de T-waarde voor grondwater houden.

Bij de sorptieberekeningen wordt uitgegaan van:

- Een relatief arme bodemsamenstelling volgens tabel A3 (de meeste verontreinigingen bevinden zich in zandige aquifers).
- Er wordt rekening gehouden met competitie door macrocomponenten en effecten van DOC bij een gemiddelde grondwatersamenstelling in Nederland (zie tabel A2).
- Competitie door andere verontreinigingen is niet verdisconteerd (meestal is op een locatie één metaal dominant).

Bij berekeningen van de verspreiding wordt uitgegaan van:

- De uitgangspunten voor sorptie als boven.
- Een voor sorptie beschikbare concentratie van 10^* de I-waarde. Dit is op basis van praktijkwaarnemingen een redelijke waarde voor concentraties in de pluim van verontreinigde locaties.

Het is duidelijk dat de gehanteerde aannames niet voor iedere locatie volledig juist zullen zijn. Een eerste controle is mogelijk door de bodem- en grondwatersamenstelling van de locatie te vergelijken met de uitgangswaarden voor de berekeningen. Uiteindelijk zal echter in stap 4 een definitieve verificatie uitgevoerd moeten worden.

Tabel A2. Uitgangspunten grondwatersamenstelling. Concentraties in mg/l.

Parameter	Range precipitatie	Waarden bij sorptie
Natrium (Na)	34,5	34,5
Calcium (Ca)	80,2	80,2
Aluminium (Al)	2,7	2,7
Mangaan (Mn)	0,05	0,05
IJzer (Fe)	0,06	0,06
Bicarbonaat (HCO ₃)	30,5-3050	305
Chloride (Cl)	53,3	53,3
Sulfaat (SO ₄)	4,8-480,5	48,1
Totaal-P (P)	0,1-6,2	0,6
DOC	-	10

Tabel A3. Uitgangspunten bodemsamenstelling.

Parameter	Gehalte (% van ds)
Lutum	1
Gloeiverlies	0,4
Fe/Al-(hydr)oxiden	0,2
CaCO ₃	0,1

2.3 Benodigde gegevens

Voor deze indicatieve beoordeling wordt uitgegaan van monsterneming van 3 tot 5 peilbuizen, die bij voorkeur in een stroombaan van de verontreiniging staan. Eén peilbuis staat in de bron, één voor het front van de pluim (referentie benedenstreams) en 1 tot 3 peilbuizen in de pluim (bij een pluim <100 meter is 1 peilbuis voldoende, bij grotere pluimen 2-3 peilbuizen). Zo veel mogelijk wordt uitgegaan van bestaande peilbuizen. De bodemsamenstelling is mogelijk deels bekend uit eerder onderzoek. Er kan in eerste instantie ook worden uitgegaan van de aanname bij een arme bodemsamenstelling (tabel A3). Deze zal echter in een later stadium geverifieerd moeten worden. Voor het aantal analyses van de bodemsamenstelling geldt hetzelfde als voor het aantal peilbuizen.

De benodigde gegevens zijn:

Minimaal: concentraties van verontreinigingen, geleidbaarheid (E.C.), pH, in-situ redoxpotentiaal (Eh), sulfaat en (bi)carbonaat in het grondwater.

Bij berekening van het benodigd bodemvolume om metalen in voldoende mate te kunnen binden: lutum, humus, Ca-carbonaat, oxalaatextraheerbare Fe- en Al-hydroxiden volgens NEN 5776 en DOC (zie ook de bovenstaande opmerking om eerst te rekenen met defaultwaarden), vracht aan beschikbare verontreiniging.

Eventueel, om meer zekerheid te krijgen betreffende de in-situ redoxcondities: zuurstof in-situ, nitraat, totaal opgelost Fe, Fe(II) en Ca, aanvullend sulfide en methaan, indien Eh-meting wijst op mogelijk sulfaatreducerende of methanogene condities.

Verder zijn van belang aanwijzingen vanuit het veld (historische gegevens, verspreidingspatroon van de verontreiniging).

2.4 Werkwijze

Algemeen

Bij de beschrijving van de werkwijze wordt er vanuit uitgegaan dat het Excel-bestand VI&SI (bijlage D), beschikbaar is. Wanneer dit niet het geval is, kan de interpretatie ook handmatig plaatsvinden.

Eerste beoordeling vastlegging

Ga naar het werkblad VI-figuren en voer de meetwaarden van de pH en de redoxpotentiaal in naast het diagram van het betreffende metaal. De meetpunten worden vervolgens automatisch geprojecteerd in het diagram. Dit kan ook handmatig worden gedaan door de meetwaarden te plotten in de figuren in bijlage B.

In de diagrammen kan nu worden afgelezen of vastlegging op de locatie naar verwachting in voldoende mate plaatsvindt (groen), in onvoldoende mate (rood) of dat nadere gegevens gewenst zijn (oranje). Als de meetpunten in een gearceerd gebied liggen is sorptie het bepalende proces en moeten altijd aanvullende berekeningen worden uitgevoerd (zie volgende). In niet gearceerde vlakken is precipitatie het bepalende proces en is een verspreidingsberekening in theorie niet nodig. Als er aanwijzingen zijn dat precipitatie niet of onvoldoende optreedt, kan aanvullend sorptie worden beschouwd als vastleggingsmechanisme. Deze beschouwing moet dan wel worden gebaseerd op een bodemsamenstelling die in het laboratorium is bepaald (dus niet op defaultwaarden). In sommige mineraalvelden zijn ijzeroxides namelijk instabiel.

Indien een meetpunt op de grens van precipitatie- en sorptie-bepaalde vastlegging ligt, moet worden uitgegaan van sorptie. Indien zich meetpunten in een oranje zone van sulfideprecipitatie bepaalde vastlegging bevinden (dit zijn zones linksonder in de diagrammen, bij arseen rechtsonder) moet de hoogte van de sulfaatconcentraties worden getoetst. Als de concentratie voldoet aan de hoogste waarde uit tabel A2 is verder onderzoek niet nodig en mag het oranje gebied als groen worden beschouwd. Als de sulfaatconcentratie lager is dan de hoogste waarde uit tabel A2 is nader onderzoek noodzakelijk (stap 4). *Niet-gearceerde* oranje vlakken die *links bovenin* de diagrammen liggen, betekenen dat de stabiliteit van de ijzer- en aluminiumoxiden in dit gebied onzeker is. In de eerste plaats moet dan het gehalte van deze componenten door meting geverifieerd worden (voor zover dit nog niet is gedaan). Verder moeten wellicht aanvullende eisen worden gesteld aan verhoging van de pH, omdat de stabiliteit van de oxiden op langere termijn niet is gegarandeerd. Dit aspect moet in de stap 3 (en 4) nader worden onderzocht.

Wanneer meetpunten in een oranje gearceerd gebied van sorptie liggen, wordt de T-waarde voor grondwater overschreden *indien* de gehalten aan adsorberende fasen in de bodem gelijk zijn aan de uitgangswaarden voor een arme aquifer (zie tabel A3) of lager zijn en de beschikbare metaalconcentratie gelijk is aan 10x de interventiewaarde³. Primair moet dan de samenstelling van de bodem geverifieerd worden (dat wil zeggen de werkelijke waarden bepalen en niet rekenen met de default-waarden). Vervolgens kan op de normale wijze de verspreidingsberekening worden uitgevoerd (zie volgende). Een lage sorptie-capaciteit wil niet zeggen dat vastlegging op voorhand moet worden uitgesloten. Wel zal de verspreiding toenemen en deze moet worden getoetst.

³ Dit is een uitgangspunt bij de modelberekeningen. Verificatie is mogelijk in stap 4 van het BOS.

Verspreidingsberekening

De verspreidingsberekening levert een indicatie van het bodemvolume dat nodig is om de verontreiniging door sorptie vast te leggen. Hieruit kan de toekomstige omvang van de pluim worden berekend, waarbij wordt aangenomen dat de vorm van de pluim niet verandert. Het berekenen van de verspreiding gebeurt met het blad VI-sorptietabel van het Excel-bestand VI&SI.

Hierin moeten de volgende parameters worden ingevoerd:

1. bodemsamenstelling: lutum, humus, Fe- en Al-oxiden, DOC in het grondwater. Gebruik de default-waarden uit de tabellen A2 en A3 of voer de gemeten waarden in. De gemeten waarden aan oxalaatextraheerbaar Fe en Al moeten worden omgerekend naar oxiden door Fe in gram/kg ds met een factor 0,16 te vermenigvuldigen en Al in gram/kg ds met een factor 0,33 en vervolgens Fe en Al te sommeren. Het resultaat is de som van Fe- en Al-oxiden in % van ds. Als met default-waarden wordt gerekend en het om een zandige aquifer gaat, moet tevens separaat het effect van een hoger gehalte aan Fe/Al-oxiden (0,4 %) en een lager gehalte aan organische stof (0,1% en 0,2%) worden doorgerekend.
2. Fysische bodemkenmerken: droge dichtheid en verhouding waterfase/vaste fase (L/S): uitgaan van defaultwaarden van 1.600 kg/m³ en 0,1875 l water/kg ds, tenzij er reden is om uit te gaan van andere waarden (klei- of veengrond).
3. Verontreinigingssituatie: bodemvolume dat verontreinigd is (T-waarde contour in de verzadigde zone; in m³) en beschikbare vracht aan metaal (in kg). Hierbij moet uitgegaan worden van het dominant aanwezige metaal. Voor de elementen chroom en arseen moet worden nagegaan in welke valentie deze elementen dominant aanwezig zijn (chrom(VI) of chrom(III); arseen(V) of arseen(III)). Per valentie zijn aparte kolommen in het werkblad aanwezig. Overigens moet de vracht steeds in kg van het element (bijvoorbeeld Cr, niet CrO₄) worden ingevuld. De valentie van chroom kan het beste door analyse worden bepaald, die van arseen kan worden afgeleid uit het pH/redoxdiagram. De beschikbare vracht zal normaliter niet bekend zijn, de opgeloste vracht wel. De beschikbare vracht zal veelal (aanzienlijk) hoger zijn dan de opgeloste vracht, tenzij er sprake is van een zure pH (≤ 4) en metalen in kationvorm of een component als chroom (VI) bij neutrale tot basische pH. Als bovengrens voor de beschikbare vracht kan worden uitgegaan van de totaal geloosde vracht, maar die zal in veel gevallen niet bekend zijn. Om toch een idee te krijgen van het effect van de reversibel geadsorbeerde vracht in de bodem wordt aanbevolen om de berekening van de verspreiding uit te voeren voor de volgende situaties: beschikbare vracht = 1, 5, 10 en 100x de opgeloste vracht. De beschikbare vracht moet in stap 4 door metingen worden geverifieerd. Een indicatie van de juistheid van de beschikbare vracht is dat in elk geval een toename van de huidige verontreinigingspluim moet worden berekend. Men mag er immers vanuit gaan dat de bindingscapaciteit in de bestaande pluim is verbruikt. Als het model een bodemvolume berekent dat kleiner is dan de huidige omvang van de pluim, is de beschikbare vracht onderschat. Het model geeft als uitkomst het totaal benodigde bodemvolume voor vastlegging, inclusief de al aanwezige pluim.
4. De toename van de pluim wordt berekend als:

$$\text{Toename pluim} = (\text{Vol. aquifermateriaal voor binding}) / (\text{Vol. bestaande pluim})$$

Hierin is de toename van de pluim een dimensieloze verhoudingsfactor, Vol. bestaande pluim is het volume van de pluim, zoals bepaald uit de T-waardecontour in m³, Vol. aquifermateriaal voor binding is het volume, zoals bepaald met het rekenblad, in m³. Bij benadering kan de factor gelijk worden gesteld aan de uitbreiding in horizontale richting.

De berekening kan ook handmatig worden uitgevoerd in de volgende vier stappen:

Stap 1: Bereken de bindingscapaciteit in mg metaal/kg aquifermateriaal

Op basis van de gemeten pH op een locatie wordt de bindingscapaciteit in mg metaal/kg aquifermateriaal berekend volgens:

$$BC = (\% \text{ lutum} * a) + (\% \text{ Fe/Al-oxide} * b) + (\% \text{ organische stof} * c) \quad [1]$$

Waarbij BC = bindingscapaciteit in mg metaal/kg aquifermateriaal; a, b en c zijn coëfficiënten die stofafhankelijk zijn en bovendien afhangen van de pH. Deze coëfficiënten zijn samengevat voor Zn in tabel A4, de overige waarden staan in bijlage C. In feite zijn dit de geadsorbeerde hoeveelheden per reactief oppervlak (bijvoorbeeld aan lutum) wanneer het gehalte van dat oppervlak 1% is.

Tabel A4. pH- en stofafhankelijke coëfficiënten om de vastlegging (mg metaal/ kg aquifermateriaal) te berekenen.

De getoonde coëfficiënten zijn voor Zn.

pH	A	B	C
	“lutum”	“Fe/Al”	“organische stof”
4	0,21	0,00	5,46
5	0,32	0,04	25,33
6	0,29	1,45	49,05
7	0,22	16,42	61,35
8	0,06	77,71	55,75
9	0,00	19,66	43,14
10	0,00	4,04	39,78
11	0,00	1,37	29,77
12	0,00	0,01	7,82

Stap 2: correctiefactor “d” voor DOC

Wanneer men de bindingscapaciteit in stap 1 heeft berekend, kan in principe de benodigde hoeveelheid aquifermateriaal worden geschat als de verontreinigingsvracht en de bulkdichtheid van het aquifermateriaal bekend zijn. Echter, de concentratie van een metaal in oplossing wordt in veel omstandigheden sterk verhoogd door de complexatie met opgeloste organische stof, DOC. Een manier om de uiteindelijke benodigde hoeveelheid aquifermateriaal, die nodig is om een verontreinigingsvracht te kunnen vastleggen goed te kunnen inschatten, is door het toepassen van een correctie die afhangt van de DOC-concentratie in oplossing (mg DOC/l). Deze correctieterm, “d”, wordt als volgt berekend:

$$d = t_w + \{[\text{DOC}] * c/5\} / t_w \quad [2]$$

Hierin is d een dimensieloze grootheid, t_w is de T-waarde voor een metaal in grondwater, [DOC] is de concentratie van DOC in mg/l en c is de pH- en stofafhankelijke coëfficiënt c uit tabel A4. De term $\{[\text{DOC}] * c/5\}$ is de concentratie van het metaal in oplossing dat gecomplexeerd is met DOC. De term is dimensieloos, omdat in het getal 5 een aantal omrekeningen en grootheden zijn samengevat.

Stap 3: benodigde hoeveelheid aquifermateriaal

De benodigde hoeveelheid aquifermateriaal wordt berekend met de gegevens uit stap 1 en 2 en is gegeven door:

$$\text{Vol. aquifermateriaal voor binding} = (\text{Vracht} * d * 10^6) / (\text{BC} * \rho_d) \quad [3]$$

Hierin is "vracht" de geschatte beschikbare verontreinigingsvracht in kg metaal, d is de correctiefactor voor DOC, BC de bindingscapaciteit en ρ_d de droge bulkdichtheid van het aquifermateriaal (bijvoorbeeld 1.600 kg/m^3). Het benodigde volume aquifermateriaal is in m^3 .

Stap 4: schatting toename verontreinigingspluim

De toename van de pluim wordt berekend als:

$$\text{Toename pluim} = (\text{Vol. aquifermateriaal voor binding}) / (\text{Vol. bestaande pluim}) \quad [4]$$

Hierin is de toename van de pluim een dimensieloze verhoudingsfactor, $\text{Vol. bestaande pluim}$ is het volume van de pluim zoals bepaald uit de T-waardecontour in m^3 , $\text{Vol. aquifermateriaal voor binding}$ is het volume zoals bepaald met formule 3, in m^3 . Bij benadering kan de factor gelijk worden gesteld aan de uitbreiding in horizontale richting.

2.5 Go-no-go criteria voor natuurlijke vastlegging

Toetsing aan pH/Eh-diagram

Go: de meetpunten bevinden zich in een groen veld van precipitatiebepaalde vastlegging.

No-go: de meetpunten bevinden zich in een rood veld. Als alternatief worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek 1: de meetpunten bevinden zich in een groen of oranje veld van sorptiebepaalde vastlegging. Ga verder met toetsing van de verspreiding (zie volgende). NB: als de meetpunten zich in een oranje veld bevinden is het vereist om de werkelijke bodemsamenstelling door analyse te bepalen. Er mag niet verder met de default-samenstelling worden gerekend.

Nader onderzoek 2: de meetpunten bevinden zich in een oranje zone van sulfideprecipitatie bepaalde vastlegging. Toets of de concentratie van sulfaat in het betreffende mineraalveld voldoet aan de waarde van $\geq 480 \text{ mg/l}$. Als dit het geval is, volgt alsnog een go. Als de sulfaatconcentratie te laag is blijft de beoordeling onzeker en moet in stap 4 meer gedetailleerd onderzoek worden uitgevoerd.

Nader onderzoek 3: de meetpunten bevinden zich in een (niet gearceerde) oranje zone linksboven in het diagram (in dit gebied zijn Fe-/Al-oxiden instabiel). Bepaal de werkelijke gehalten aan oxiden op de locatie en toets de verspreiding (zie volgende). Verder dient ook het verloop van de pH op langere termijn te worden beschouwd, zie hiervoor stap 3 (paragraaf 5.3). Indien de verspreiding onder de huidige condities acceptabel is of aannemelijk kan worden gemaakt dat de pH door toevoer van grondwater in de toekomst zal toenemen tot een waarde, waarbij de verspreiding acceptabel is, volgt alsnog een go. In andere gevallen worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek 4: de pH op de locatie ligt *plaatselijk* in een rood gebied van de vastleggingsindicator door lekkage van zuur of iets dergelijks. Nagegaan moet worden of de buffercapaciteit van de bodem en het grondwater voldoende zijn om het zuur te neutraliseren of, als dit niet het geval is, neutralisatie door additie van stoffen mogelijk is (uitvoeren in stap 3 of stap 4).

Toename van de pluim

Deze toetsing geldt alleen voor sorptie.

Go: de toename van de pluim is een factor 2 of minder en bereikt geen kwetsbare objecten.

No-go: de toename van de pluim is een factor 10 of meer. Als alternatief worden de mogelijkheden voor gestimuleerde precipitatie beschouwd.

Nader onderzoek: de toename van de pluim is een factor 2-10 en/of bereikt mogelijk kwetsbare objecten (stap 3).

Toelichting bij de getallen: vanuit het beleid is een toename van de pluim ongewenst. Een factor 2 wordt, gezien de beperkte uitbreiding en het indicatieve karakter van de onderhavige berekening, als acceptabel gezien. Een factor 10 is ook bij de onzekerheid van de uitkomst dermate hoog, dat natuurlijke vastlegging in de regel beleidsmatig niet haalbaar zal zijn (zie echter ook het volgende).

Bij de uitbreiding van de pluim moet altijd rekening worden gehouden met de aanwezigheid van kwetsbare objecten (zie stap 0). Indien ook bij een aanzienlijke toename van de pluim geen kwetsbare objecten worden bedreigd, is er mogelijk toch nog ruimte voor natuurlijke vastlegging. Dit moet worden afgestemd met het bevoegd gezag. Hierbij zal de haalbaarheid van alternatieven een belangrijke rol spelen.

2.6 Go-no-go criteria voor gestimuleerde vastlegging

Natuurlijke vastlegging biedt geen perspectief als de pH van de bodem zeer laag is of als de sorptiecapaciteit onvoldoende is in relatie tot de verspreiding. Beide factoren kunnen ondervangen worden door bepaalde vormen van gestimuleerde precipitatie. pH-correctie is mogelijk door bijvoorbeeld injectie van bicarbonaat. Bij een hogere pH wordt de natuurlijke bindingscapaciteit van de bodem vergroot. Verder kunnen diverse additieven worden toegevoegd, waarmee precipitatie wordt bevorderd. Uit oogpunt van macrochemische condities zijn er op voorhand geen redenen om gestimuleerde vastlegging uit te sluiten. Wel is deze variant niet logisch in het geval van een slecht doorlatende bodem, omdat het substraat dan niet in de bodem kan worden verspreid. Dit leidt tot de volgende beoordeling:

No-go: de bodem van de locatie is dermate slecht doorlatend dat substraten niet goed in de bodem gebracht kunnen worden.

Go: de bodem van de locatie maakt het mogelijk om substraten te doseren.

3 Stap 1.2: Indicatieve beoordeling van vastlegging met behulp van de stabiliteitsindicator

3.1 Algemeen

In onderstaand kader is de inhoud van stap 1.2 in hoofdlijnen weergegeven.

Stap 1.2 Indicatieve beoordeling van vastlegging met behulp van de stabiliteitsindicator

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 1.2 is om een eerste kwalitatieve tot semi-kwantitatieve beoordeling uit te voeren van de lange termijn stabiliteit van de gevormde metaalverbindingen in de bodem. Aangegeven wordt of er in de toekomst remobilisatie kan optreden. Uitvoering van deze stap is relevant voor natuurlijke én gestimuleerde vastlegging.

Achtergrond

De stabiliteit van metaalbindingsvormen op een locatie is met name afhankelijk van de pH en de redoxpotentiaal (Eh). Hiermee wordt rekening gehouden bij de beoordeling van de vastlegging. Bij de stabiliteitsindicator gaat het erom in te schatten in hoeverre pH- en redoxcondities in de toekomst zullen veranderen. De risico's op remobilisatie zijn met name verbonden met verzuring en stijging van de redoxpotentiaal. De kans op een ontoelaatbare pH-daling wordt afgeleid uit de atmosferische zuurdepositie in relatie tot de buffercapaciteit van de bodem. De kans op een ontoelaatbare toename van de redoxpotentiaal wordt afgeleid uit de mogelijke toestroming van geoxideerd grondwater of menselijke ingrepen in het grondwatersysteem.

Benodigde gegevens

- Macrosamenstelling van de bodem in en boven de verontreinigingspluim: gehalten aan lutum, organische stof, Fe-/Al-oxiden en carbonaten (grotendeels identiek aan stap 1.1.). Eventueel kan eerst met default-waarden worden gerekend.
- Kwaliteit van het bovenstroomse grondwater, met name of dit een geoxideerd karakter heeft (zuurstof- of nitraatrijk). Dit is alleen van belang indien de verontreinigde aquifer een sulfaatreducerend milieu heeft.
- Informatie over eventuele ingrepen in het grondwatersysteem (verzameld in stap 0).
- Ligging van de verontreinigingspluim ten opzichte van maaiveld.

Werkwijze

De kans op verzuring wordt berekend met een formule, waarin het calciëgehalte en de diepte van de verontreinigingspluim worden ingevuld. Indien calcië onvoldoende buffert, wordt aanvullend gebruik gemaakt van een curve die de buffercapaciteit van de overige bodembestanden weergeeft. Een verandering van de redoxcondities wordt alleen onderzocht indien uit stap 1.1 blijkt dat sulfideprecipitatie een belangrijk mechanisme is voor de vastlegging. Er wordt nagegaan of geoxideerd grondwater de locatie binnen 100 jaar kan bereiken of dat menselijke ingrepen naar verwachting zullen leiden tot een redoxpotentiaal die buiten het stabiliteitsveld voor sulfiden ligt. Het resultaat is dat de kans op ontoelaatbare verzuring en/of stijging van de redoxpotentiaal zeer gering is (groen veld), onzeker (oranje veld) of groot is (rood veld). Als het resultaat van de beoordeling(en) 'groen' is, is natuurlijke vastlegging kansrijk en wordt verder gegaan met stap 2. Bij een negatieve uitkomst worden de mogelijkheden voor gestimuleerde vastlegging nagegaan. Bij een onzekere uitkomst wordt verder gegaan met stap 3.

3.2 Beoordeling van de stabiliteit van de pH

Opmerking vooraf: Als de vastlegging bepaald wordt door sorptie, de verontreiniging zich op een diepte van >2 m bevindt en het kalkgehalte van de grond meer is dan 0,1% CaCO₃, kan op voorhand geconcludeerd worden dat er geen risico's zijn op verzuring door atmosferische depositie. Eventuele andere problemen op de locatie, bijvoorbeeld een zuurspill, moeten wel worden beschouwd.

Bij de beoordeling van de stabiliteit van de pH wordt primair uitgegaan van het risico van verzuring door atmosferische depositie van zuur, gevolgd door percolatie. Hierdoor kan vanaf het maaiveld de pH in de loop van de tijd gaan dalen. Op sommige locaties kan de toplaag al verzuurd zijn. Een ander risico is dat op een locatie in het verleden door calamiteiten of lozingen zuur in de bodem terecht is gekomen. Dit zuur zal zich met het grondwater door de bodem verplaatsen. Enerzijds kan de bodem zo over een groter oppervlak verzuren, anderzijds kan het zuur door reactie met de bodem of door instroom van grondwater met een hogere pH weer geneutraliseerd worden. De effecten van zuurspills e.d. worden niet routinematig beoordeeld, zie hiervoor stap 3.

Verzuring door **atmosferische depositie** kan worden beoordeeld met het werkblad SI van het Excel-bestand VI&SI. De vereiste berekeningen zijn echter zo eenvoudig dat ook kan worden uitgegaan van een handmatige procedure (zie onder).

De verzuring wordt standaard beoordeeld op basis van een gemiddelde zuurdepositie in Nederland van 3100 eq H⁺/ha, j. Dit is 0,31 eq H⁺/m², j. Indien meetgegevens voorhanden zijn van lokale stations, kunnen deze worden gebruikt.

De buffercapaciteit van 1% (m/m) calciet (CaCO₃) is bij een neutrale pH 0,12 eq H⁺/kg bodem ofwel 192 eq H⁺/m³ (bij een droge dichtheid van 1.600 kg/ m³). Afhankelijk van de dikte van de bodemlaag boven de verontreinigde aquifer en het werkelijke calcietgehalte kan nu worden uitgerekend of verzuring een risico vormt. Bij een default-waarde van 0,1% CaCO₃ is een minimale laagdikte van 1,6 m vereist. Aangezien de verontreinigde aquifer zich in de praktijk bijna altijd op grotere diepte bevindt en 0,1% CaCO₃ meestal wel aanwezig is, is het risico van verzuring door atmosferische depositie niet groot. Door te rekenen met de buffercapaciteit bij neutrale pH (1,2 mol H⁺/mol CaCO₃) wordt de totale buffercapaciteit mogelijk onderschat. Als de pH daalt tot 5 is de buffercapaciteit circa 2 mol H⁺/mol CaCO₃. Het is echter niet zeker dat deze capaciteit volledig op de locatie beschikbaar komt, zodat het gebruik van circa 67% van de totale buffercapaciteit een veilige benadering is.

Naast CaCO₃ kunnen andere bodembestanddelen ook zuur bufferen. Als de buffercapaciteit van CaCO₃ onvoldoende is om de zure depositie te bufferen (dat wil zeggen, de pH zal tot in de verontreinigde aquifer aanzienlijk gaan dalen), moet aanvullend worden gekeken naar de andere bodembestanddelen. Dit kan het eenvoudigst als volgt worden gedaan:

1. Stel met de vastleggingsindicator vast bij welke pH vastlegging tot onder de t-waarde niet meer gewaarborgd is. Ga daarbij uit van een gelijkblijvende Eh en lees in het diagram af bij welke pH de groene zone overgaat in een oranje (of eventueel een oranje in een rode). De overgang ligt vaak bij een pH van circa 4.
2. Lees in figuur A2 af wat het verlies van buffercapaciteit is als de pH daalt van de uitgangswaarde naar de kritische waarde. Als de pH bijvoorbeeld daalt van 8 naar 4 wordt 0,006 mol/kg (het deel van pH 4 tot pH 7) + 0,001 mol/kg (het deel van pH 7 tot pH 8) = 0,007 mol H⁺/kg bodem verbruikt. Over een profiel van bijvoorbeeld 2 meter komt dit overeen met 2 x 1600 x 0,007 = 22.4 mol H⁺. Als er geen calciet aanwezig is, is deze waarde bereikt na 22,4

$\text{mol H}^+ / 0.31 \text{ mol H}^+/\text{jr} = 72 \text{ jaar}$. Indien er wel 0.1 % calcië aanwezig is, dan is de buffercapaciteit na $(2 \times 1600 \times 0,12 \times 0,1) / 0,31 + 22.4 / 0.31 = 196 \text{ jaar}$ uitgeput.

Een beperkte verzuring van de aquifer hoeft niet meteen problematisch te zijn. Als er bijvoorbeeld sprake is van een verontreinigde laag van 10 meter dik en na 100 jaar is de bovenste meter verzuurd én het grondwater beweegt zich overwegend neerwaarts (infiltratie), resulteert dit mogelijk in een beperkte uitbreiding van de verontreinigingsvlek. Bij overwegend horizontaal transport kan een beperkte verzuring echter wel onacceptabel zijn. In onduidelijke situaties is daarom nader onderzoek vereist.

Stap (3): ANC curve "arme" aquifer
exclusief calcië

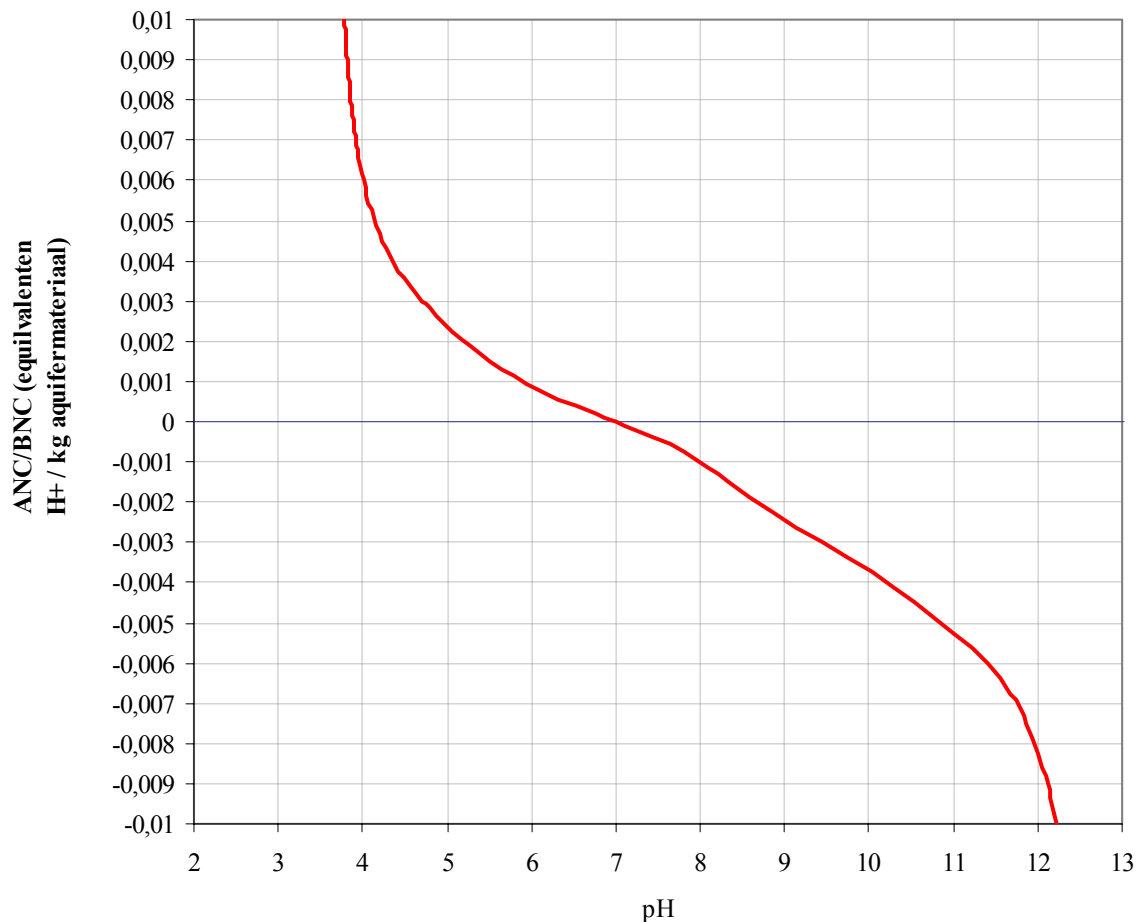


Fig. A2. Buffercurve van een arme aquifer, zonder kalk. Verbruik van zuur (of base) als functie van de pH, in mol H⁺/kg aquifer materiaal (ds).

3.3 Beoordeling van de stabiliteit van de redoxcondities

Het risico van veranderingen van de redoxcondities is vooral gelegen in een *toename* van de redoxpotentiaal wanneer een verontreiniging als gevolg van reducerende omstandigheden is vastgelegd (met name in de vorm van metaalsulfides). Dit kan worden afgelezen in de vastleggingsindicatoren (zie bijlage B of het Excel-bestand VI&SI). Een toename van de Eh kan verder betekenen dat driewaardig arseen wordt omgezet in vijfwaardig arseen (gunstig voor de vastlegging). Oxidatie van chroom is onder aquifercondities onwaarschijnlijk. Afgezien van veranderingen in de valentie van elementen, is sorptie bij de huidige benadering ongevoelig voor veranderingen in de redoxcondities. Door een toename van de stabiliteit van ijzeroxiden is een verhoging van de redoxpotentiaal wellicht gunstig voor de adsorptie.

In theorie hoeft een verhoging van de redoxpotentiaal ook bij oxidatie van sulfiden niet te leiden tot remobilisatie van zware metalen, omdat de metalen weer in andere vormen vastgelegd kunnen worden, zie bijvoorbeeld de vastleggingsindicatoren van Cu en Zn. Het is echter niet altijd zeker welke gevolgen een verhoging van de redoxpotentiaal heeft voor de zuurgraad.

Uit de definitiestudie [2] is gebleken dat de oorzaken van een toename van de Eh vooral zijn gelegen in menselijke ingrepen (bemalingen, onttrekkingen) en aanvoer van geoxideerd, met name nitraatrijk, grondwater. Voor de beoordeling van de stabiliteit van de redoxcondities zal worden uitgegaan van de kans op verstoring van de redoxcondities door menselijke ingrepen en/of toestroom van nitraatrijk grondwater, bijvoorbeeld als gevolg van intensieve veehouderij nabij de locatie (omgevingstoets).

Praktisch gezien dient het volgende te worden uitgevoerd:

- 1) Stel vast of er op basis van de vastleggingsindicator (stap 1.1) sprake is van vastlegging in de vorm van sulfiden. Als dit niet het geval is, is verdere beoordeling van redox-effecten in dit stadium niet nodig. Als er wel sulfides aanwezig zijn dienen de volgende stappen te worden doorlopen;
- 2) Ga na op basis van informatie die in stap 0 is verzameld of binnen 100 jaar geoxideerd (bijvoorbeeld nitraatrijk) grondwater kan toestromen of dat er op of nabij de locatie werken uitgevoerd kunnen worden die resulteren in een aanzienlijke verlaging van de grondwaterstand of toestroom van geoxideerd grondwater.

3.4 Go-no-go criteria voor natuurlijke vastlegging

Verzuring

Go: de pH blijft op een termijn van 100 jaar binnen groene velden van de vastleggingsindicator.

No-go: de pH verschuift op een termijn van 100 jaar naar een rood veld van de vastleggingsindicator (zie ook volgende).

Nader onderzoek 1: de pH verschuift van een groen veld naar een oranje veld. Zie hiervoor de procedures onder 2.5.

Nader onderzoek 2: een beperkt deel (bijvoorbeeld 10-20%) van de aquifer zal in 100 jaar in ontoelaatbare mate verzuren, maar het is mogelijk dat de verontreiniging op grotere diepte weer wordt vastgelegd. Dit aspect dient nader te worden onderzocht in stap 4.

Toename van de redoxpotentiaal (toetsing alleen indien vastlegging in de vorm van sulfiden optreedt)

Go: er is bovenstrooms binnen een reistijd van 100 jaar geen grondwater met een geoxideerd karakter aanwezig en er zijn geen aanwijzingen dat werken uitgevoerd gaan worden die resulteren in een onaanvaardbare verlaging van de grondwaterstand of het aantrekken van grondwater met een geoxideerd karakter.

Nader onderzoek: het is niet uitgesloten dat de redoxpotentiaal op termijn gaat stijgen tot buiten het stabiliteitsgebied van de sulfiden (voor oorzaken zie vorige). Uitvoeren in stap 3 (grondwaterkwaliteit, geohydrologie etc. nader beschouwen).

3.5 Go-no-go criteria voor gestimuleerde vastlegging

Een negatief oordeel over de stabiliteit van natuurlijke vastlegging heeft geen consequenties voor de haalbaarheid van gestimuleerde vastlegging, zoals die in 2.6 is beoordeeld. Zowel verzuuring als een toename van de redoxpotentiaal zijn in algemene zin geen belemmering voor gestimuleerde vastlegging. Wel kan dit bepaalde vormen van gestimuleerde vastlegging uitsluiten, omdat de verbindingen op langere termijn instabiel worden als gevolg van oxidatie of pH-verlaging. Een punt voor nader onderzoek is de mogelijkheid om stabiele condities te realiseren door regelmatige herhaling van substraatdosering. Dit moet worden uitgevoerd in stap 2 (kosten, acceptatie bevoegd gezag). Alleen de (on)mogelijkheid om substraten in de bodem te brengen, zoals beoordeeld in 2.6, is een absoluut criterium voor gestimuleerde vastlegging.

4 Stap 2: Indicatieve beoordeling van de kosteneffectiviteit van vastlegging

4.1 Algemeen

Stap 2: Indicatieve beoordeling van de kosteneffectiviteit van vastlegging

Doelstelling en resultaat

De doelstelling van stap 2 is het positioneren van vastlegging ten opzichte van andere sanerings- of beheersingsalternatieven, op basis van kosteneffectiviteit en de bijdrage aan het bereiken van een stabiele eindsituatie. Bij een positief oordeel wordt verder gegaan met stap 3.

Achtergrond

Deze stap wordt uitgevoerd omdat vastlegging als saneringsalternatief moet passen binnen het overheidsbeleid zoals vastgelegd in het Kabinetsstandpunt 'Van trechter naar zeef' en doorstart A5 [6,7]. Hierin is aangegeven dat men zich bij de verwijdering van verontreinigingen in de ondergrond mag laten leiden door het begrip 'kosteneffectiviteit'. Voor de definitieve uitwerking van stap 2 zou nauw moeten worden aangesloten bij de uitkomsten van het SKB-project ROSA. In dit project wordt gekeken naar een praktische invulling van de beleidsmatige begrippen kosteneffectiviteit en stabiele eindsituatie.

Kosteneffectiviteit kan worden bepaald door een afweging ten opzichte van alternatieven op basis van de relevante kosten en baten. Hieronder worden ondermeer verstaan risico's, milieuverdienste en kosten. In de volgende paragraaf staan mogelijke criteria voor de bepaling van kosteneffectiviteit. Bij voldoende gegevens kan in dit stadium een RMK-beoordeling worden uitgevoerd. RMK is een beslissingsondersteunend systeem, dat bodemsaneringvarianten evalueert, vergelijkt en ordent op basis van Risicoreductie, Milieuverdienste en Kosten [5].

Werkwijze

Om inzicht te krijgen in de kosteneffectiviteit van natuurlijke vastlegging en alternatieve saneringsvarianten wordt de volgende werkwijze gehanteerd:

- Bepaling omvang van de verontreiniging;
- Inschatten van de verspreiding van de verontreinigingen, zonder maatregelen (ook zonder natuurlijke vastlegging);
- Bepaling actuele humane risico's in de huidige situatie;
- Globale uitwerking van de saneringsalternatieven (technieken, hoeveelheden, tijdsduur, etc.). Hierbij dient tenminste een variant uitgaande van volledige verwijdering te worden uitgewerkt. Daarnaast is het in de meeste gevallen van belang ook een beheersvariant uit te werken;
- Bepaling globale kosten van de saneringsalternatieven;
- Bepaling achterblijvende restverontreiniging en nazorgmaatregelen per saneringsvariant;
- Kwalitatieve afweging van de saneringsvarianten op basis van kosteneffectiviteit (bekijken welke criteria van belang zijn en hoe de varianten hierop beoordeeld worden);
- Inzicht in de belangrijkste factoren die de onzekerheid van de verschillende varianten bepalen;
- Positionering alternatieven op de saneringsladder (zie deze bijlage paragraaf 4.3).

Benodigde informatie

Ten behoeve van het uitvoeren van een beoordeling op kosteneffectiviteit en de inschatting van een stabiele eindsituatie is veel informatie nodig over de verschillende saneringsalternatieven. Deze informatie kan in dit stadium gegenereerd worden op basis van expert guess. Wel is het van belang de mate van zekerheid van een bepaalde uitkomst aan te geven. Als al een saneringsonderzoek is uitgevoerd is een meer kwantitatieve beoordeling mogelijk.

4.2 Mogelijke criteria voor de bepaling van de kosteneffectiviteit

Kosten

- saneringskosten;
- zorgkosten tijdens en na de sanering;
- maatschappelijke kosten (gebruiksbeperkingen);
- relatieve waardevermindering/waardevermeerdering;
- herinvesteringskosten;
- risico's;
- onzekerheden.

Stabiele eindsituatie

- ontwikkeling van de pluim in de tijd;
- verwachte concentratie na 30 jaar;
- maximale omvang van de pluim;
- nazorgloze situatie.

Negatief effect

- saneringsduur;
- verstoring/ruimtebeslag/invloed op de omgeving/invloed op ruimtelijke ontwikkelingen;
- omvang restverontreiniging;
- verontreiniging andere compartimenten;
- bedreigde kwetsbare objecten;
- energieverbruik;
- grondstoffenverbruik;
- vrijkomende afvalstoffen;
- onzekerheid;
- nazorg (actief en passief);
- verdroging;
- verzilting.

Positief effect

- milieuverdienste;
- eindconcentratie (beoogd en feitelijk);
- bodem met minder gebruiksbeperkingen;
- reductie humane risico's;
- reductie ecologische risico's;
- vrachtreductie.

Overig

- technische haalbaarheid;
- terugvalscenario;
- maatschappelijke urgentie;
- ijkmomenten/monitoring;
- imago.

4.3 Go-no-go criteria

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor natuurlijke vastlegging

Go: de verwachting is dat NV de meest kosteneffectieve variant is (laagste kosten tegen hoogste opbrengsten) en leidt tot een stabiele eindsituatie (geen monitoring na 30 jaar).

No-Go: er zijn goedkopere alternatieven die niet onderdoen qua effectiviteit en wel leiden tot een stabiele eindsituatie.

Nader onderzoek: het is onduidelijk op basis van de beoordeling hoe natuurlijke vastlegging zich verhoudt tot andere varianten óf geen van de varianten leidt waarschijnlijk tot een stabiele eindsituatie. Veelal zal dit nader onderzoek zich richten op de verwachte pluimontwikkeling. Dit onderzoek vindt in stap 4 plaats.

Te toetsen aspecten en bijbehorende go-no-go-criteria voor gestimuleerde vastlegging

Dit is vergelijkbaar met natuurlijke vastlegging. Gestimuleerde vastlegging heeft echter wel andere onzekerheden (bijvoorbeeld mogelijkheden tot infiltratie) en kosten.

4.4 Positionering saneringsladder

Bij de afweging van vastlegging als saneringsalternatief wordt gebruik gemaakt van de saneringsladder (zie figuur A3).

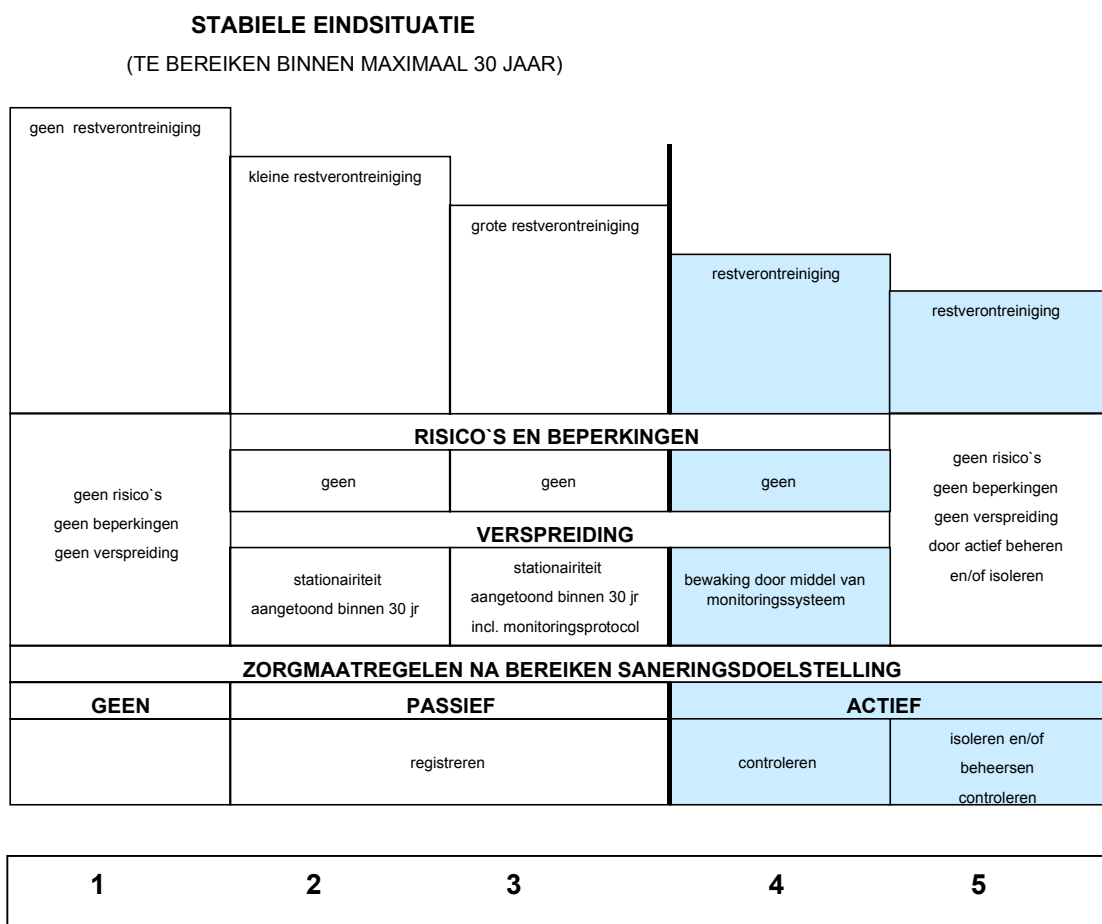


Fig. A3. Keuzeproces volgens de saneringsladder [7].

Er dient bij de vergelijking van de alternatieven in elk geval een alternatief op trede 1 te worden meegenomen, ter vergelijking met de andere alternatieven. Varianten hoger op de ladder hebben

beleidsmatig namelijk de voorkeur. Veelal zal vastlegging zich bevinden tussen trede 3 en 4. Voor de vergelijking is het belangrijk ook andere alternatieven te positioneren op deze ladder. Indien een alternatief zich op trede 4 of 5 bevindt is er geen sprake van een stabiele eindsituatie. Dit is beleidsmatig een minder wenselijke situatie en vraagt dus over het algemeen een betere onderbouwing van de keuze. In de praktijk zal het in dit stadium veelal onzeker zijn of vastlegging op trede 3 of 4 gepositioneerd kan worden. In stap 4 en 5 van het BOS zal deze onzekerheid beter in kaart moeten worden gebracht.

5 Stap 3: aanvullend onderzoek stap 0-2 en overleg bevoegd gezag

5.1 Inleiding

Indien het in de stappen 0-2 beschreven onderzoek onvoldoende duidelijkheid geeft over de mogelijkheden voor vastlegging, omdat één van de beoordelingen 'oranje' blijft, moet in deze stap aanvullend onderzoek worden uitgevoerd. Op basis van dit onderzoek kan worden beslist of doorgegaan wordt met fase 2 (stap 4 en 5) of dat natuurlijke vastlegging geen alternatief vormt voor de betreffende locatie. Indien natuurlijke vastlegging geen perspectief biedt, dienen de mogelijkheden van gestimuleerde vastlegging te worden onderzocht.

In algemene zin geldt dat de aard van aanvullend onderzoek divers zal zijn. Het is niet mogelijk om elke praktijksituatie te voorzien en een systeem te beschrijven dat in 100% van de gevallen sluitend is. Met andere woorden, er moet vanuit deskundigheid worden beoordeeld wat de beste aanpak is. Tevens geldt dat beoordeeld moet worden of de omvang van de onzekerheden dermate groot is dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is om tot een goed oordeel te komen over de haalbaarheid van natuurlijke vastlegging. In situaties met beperkte onzekerheden kan overwogen worden om het aanvullend onderzoek te combineren met stap 4, die (in geval van een positief oordeel) toch moet worden uitgevoerd. Het combineren van de onderzoeken heeft uit oogpunt van efficiëntie de voorkeur.

De doelstelling van het aanvullend onderzoek is dus om informatie die essentieel is voor de beoordeling van de stappen 0-2 in voldoende mate te verkrijgen. Tevens wordt in stap 3 naar aanleiding van de resultaten overleg gevoerd met het bevoegd gezag. Doelstelling hiervan is om de mening en randvoorwaarden van het bevoegd gezag helder te krijgen. Dit betreft bijvoorbeeld zaken als de invulling van het begrip stabiele eindsituatie (welke pluimuitbreiding wordt acceptabel geacht, over welke tijdsperiode). Op basis van dit overleg kan de onderzoeksopzet van fase 2 (stappen 4-5) nader worden ingevuld.

5.2 Nader onderzoek vastlegging

Nader onderzoek naar vastlegging is noodzakelijk bij de volgende uitkomsten van de toetsing aan de vastleggingsindicator:

- a) De meetpunten bevinden zich (eventueel voor een deel) in een oranje zone van precipitatie bepaalde vastlegging en de concentraties van relevante macroparameters in het betreffende gebied (bijvoorbeeld sulfaat) zijn onbekend.
- b) De meetpunten bevinden zich in een (niet gearceerde) oranje zone linksboven in het diagram (in dit gebied zijn Fe-/Al-oxiden instabiel).
- c) De toename van de pluim bij sorptie-bepaalde vastlegging is een factor 2-10.

De volgende acties zijn denkbaar. Voor alle bovengenoemde aspecten geldt dat met name op grotere locaties rekening moet worden gehouden met variatie in bodem- en grondwaterkwaliteit.

Daarom kan het zinvol zijn om extra peilbuizen te bemonsteren of boringen te plaatsen, om zo doende een meer volledig beeld te krijgen van de gehalten van de betreffende parameter(s). Als hieruit andere waarden blijken, volgt opnieuw een toetsing, zoals beschreven in 2.4 en 2.5.

Wanneer gehalten van relevante macro-parameters, zoals sulfaat, niet zijn gemeten moet dit alsnog gebeuren.

Voor het onder b genoemde aspect van instabiliteit van de Fe-/Al-oxiden geldt dat, voorzover dat nog niet is gedaan, deze componenten bepaald moeten worden op veldmonsters en dat aanvullend gekeken moet worden naar het verloop van de pH op langere termijn. Zie hiervoor 5.3.

Als het beeld na aanvullende bepalingen hetzelfde blijft of de berekende pluimuitbreiding onacceptabel groot is, kan een eerste verificatie van de vastleggingscapaciteit worden verkregen door het uitvoeren van schudproeven. Hiermee kan de mate van adsorptie direct worden gemeten. Afhankelijk van de omvang van de locatie, worden 3-5 monsters ingezet die bij voorkeur afkomstig zijn van boringen voor peilbuizen. In elk geval moeten monsters worden genomen uit het gebied dat (net) benedenstrooms van de verontreinigingspluim ligt. De schudproeven worden uitgevoerd met grond en grondwater van de locatie bij een L/S (liquid/solid) –verhouding van 10, onder pH- en redoxcondities die overeenkomen met die in het veld. Indien het grondwater op de locatie zuurstofloos is moet ook onder zuurstofloze condities worden bemonsterd. Het monster wordt eerst geschud met verontreinigd grondwater. Het concentratieniveau van de verontreiniging moet representatief zijn voor de locatie. De schudduur bedraagt 28 dagen, als alleen sorptie wordt verwacht kan volstaan worden met 7 dagen. De proeven worden ingezet in volledig gevulde glazen flessen die op een roterende schudmachine worden geplaatst. Na afloop van iedere proef wordt de redoxpotentiaal in de fles gemeten, daarna wordt het water gefiltreerd over een 0,45 µm membraanfilter, worden de pH en de geleidbaarheid gemeten en wordt het water geanalyseerd op verontreinigingen en relevante macrocomponenten. Aanvullend wordt een desorptieproef uitgevoerd met hetzelfde grondmonster en niet verontreinigd grondwater van de locatie. De uitvoering van deze proef is verder identiek aan de eerste proef. De pH en redoxcondities moeten gelijk zijn aan de adsorptieproef. De adsorptie en desorptie van verontreinigingen in mg/kg d.s. worden berekend als $(\text{beginconcentratie} - \text{eindconcentratie}) \cdot 0,01$ (concentratie in µg/l, L/S = 10). Het verschil tussen adsorptie en desorptie kan **indicatief** worden beschouwd als vastgelegd. In relatie tot de vastleggingsindicator is het resultaat alleen bruikbaar indien de concentratie in de waterfase van de desorptie-proef gelijk is aan de T-waarde of eventueel lager is. Als de concentratie hoger is dan de T-waarde, moet de desorptie-proef met hetzelfde materiaal worden herhaald. Als de T-waarde is benaderd, kan het verschil tussen adsorptie en desorptie worden ingevuld als B.C. in de formule [3] uit paragraaf 2.4 (de factor d hoeft niet te worden ingevuld). De mate van verspreiding wordt verder beoordeeld, zoals beschreven in 2.5. Hieruit volgt dan indicatief of natuurlijke vastlegging haalbaar is of niet. Ook na het uitvoeren van deze proef moet stap 4 nog wel worden doorlopen.

5.3 Nader onderzoek stabiliteit

Nader onderzoek naar de stabiliteit is noodzakelijk bij de volgende uitkomsten van de toetsing aan de stabiliteitsindicator:

- a) atmosferische depositie van zuur vertegenwoordigt geen risico, maar de pH op de locatie ligt *plaatselijk* in een rood gebied van de vastleggingsindicator door lekkage van zuur o.i.d. Nagegaan moet worden of de buffercapaciteit van de bodem en het grondwater voldoende zijn om het zuur te neutraliseren.
- b) Vastlegging vindt plaats door vorming van sulfiden en het is mogelijk dat de redoxpotentiaal op termijn gaat stijgen tot buiten het stabiliteitsgebied van de sulfiden.

- c) De meetpunten van pH en redox bevinden zich in een gebied waarin Fe-/Al-oxiden instabiel zijn (zie ook vorige).

Evenals bij de vastleggingsindicator geldt dat het zinvol kan zijn om meerdere monsters te onderzoeken (zie 5.2.).

Voor de punten a en c geldt dat moet worden nagegaan of de pH zich door natuurlijke reacties kan herstellen. Dit kan enerzijds door toestroom van grondwater met een hogere pH en anderzijds doordat het zure grondwater zich verplaatst en door reactie met de bodem wordt geneutraliseerd. Om deze processen te kunnen kwantificeren is de volgende informatie vereist:

1. pH en buffercapaciteit van het bovenstroomse grondwater;
2. buffercapaciteit van grond/grondwater in het zure gebied;
3. buffercapaciteit van grond benedenstrooms van het zure gebied.

Met deze informatie kan worden uitgerekend hoeveel grondwater nodig is om de pH in het zure gebied te verhogen en hoe lang dit ongeveer duurt (hiervoor moet de snelheid van het grondwater bekend zijn). Ook kan worden berekend hoeveel bodemvolume nodig is om het aanwezige zuur te neutraliseren. Beide berekeningen resulteren in een overschatting. Slechts een deel van het zuur zal zich verplaatsen en met de ontvangende bodem reageren. Dit deel hoeft niet meer geneutraliseerd te worden door het toestromende grondwater. Van belang is met name om een indruk te krijgen van de omvang van het gebied dat nodig is om het aanwezige zuur te neutraliseren. Als eerste benadering kan de vastleggingscapaciteit in dit gebied op nul worden gesteld. Dit resulteert in een extra uitbreiding van de pluim. Als deze uitbreiding onacceptabel groot is, kan meer in detail worden gerekend met een gradiënt in de pH.

In de situatie dat een sulfaatreducerende aquifer geoxideerd kan raken wordt een proef uitgevoerd met een mengsel van grond en grondwater van de locatie bij een L/S van 2. Dit mengsel wordt aan de lucht geroerd (contact met zuurstofhoudend grondwater) of geschud in een volledig gevulde fles, nadat een overmaat aan nitraat is toegevoegd (contact met nitraathoudend grondwater). Na een reactietijd van 2 weken worden de Eh en pH van het mengsel gemeten. Deze worden vervolgens geplot in de vastleggingsindicator. De beoordeling is verder conform 2.4 en 2.5. Benadrukt wordt dat dit een indicatieve proef is en dat in stap 4 van het BOS een meer gedetailleerde beoordeling noodzakelijk blijft.

5.4 Overleg bevoegd gezag

Nadat de stappen 0-3 zijn doorlopen kan een indicatieve beoordeling worden uitgevoerd van de haalbaarheid van natuurlijke of gestimuleerde vastlegging op de onderzochte locatie. Deze beoordeling vormt de basis voor overleg met het bevoegd gezag. In het overleg moet ondermeer aan de orde komen of het bevoegd gezag de conclusies deelt, hoe het begrip stabiele eindsituatie wordt ingevuld (welke pluimuitbreiding wordt acceptabel geacht, over welke tijdsperiode), of er voor de betreffende locatie specifieke randvoorwaarden zijn, welke onzekerheden door nader onderzoek moeten worden opgeheven en dergelijke. Het is hierbij van belang om de locatie integraal te benaderen, waarbij zowel de pluim als (indien relevant) de bron worden aangepakt. Op basis van dit overleg kan de onderzoeksopzet van fase 2 (stappen 3-4) worden ingevuld.

5.5 Go-no-go criteria voor natuurlijke vastlegging

De technische beoordeling van de onderzochte aspecten verloopt overeenkomstig de beschrijvingen in stap 1. Het resultaat van het overleg met het bevoegd gezag wordt als volgt beoordeeld:

Go: het bevoegd gezag accepteert de toepassing van natuurlijke vastlegging op de locatie onder realistische randvoorwaarden.

No-go: het bevoegd gezag sluit de toepassing van natuurlijke vastlegging op de locatie uit of stelt onhaalbare randvoorwaarden.

Nader onderzoek: het is onduidelijk of bepaalde randvoorwaarden haalbaar zijn (afhankelijk van de urgentie direct onderzoeken of combineren met uitvoering van stap 4).

Afhankelijk van de uitslag van het aanvullend onderzoek, kan stap 3 worden afgesloten met een go of een no-go voor stap 4. In geval van een no-go moeten de kansen voor gestimuleerde vastlegging worden beoordeeld.

BIJLAGE B

AANVULLENDE INFORMATIE VASTLEGGINGSINDICATOR

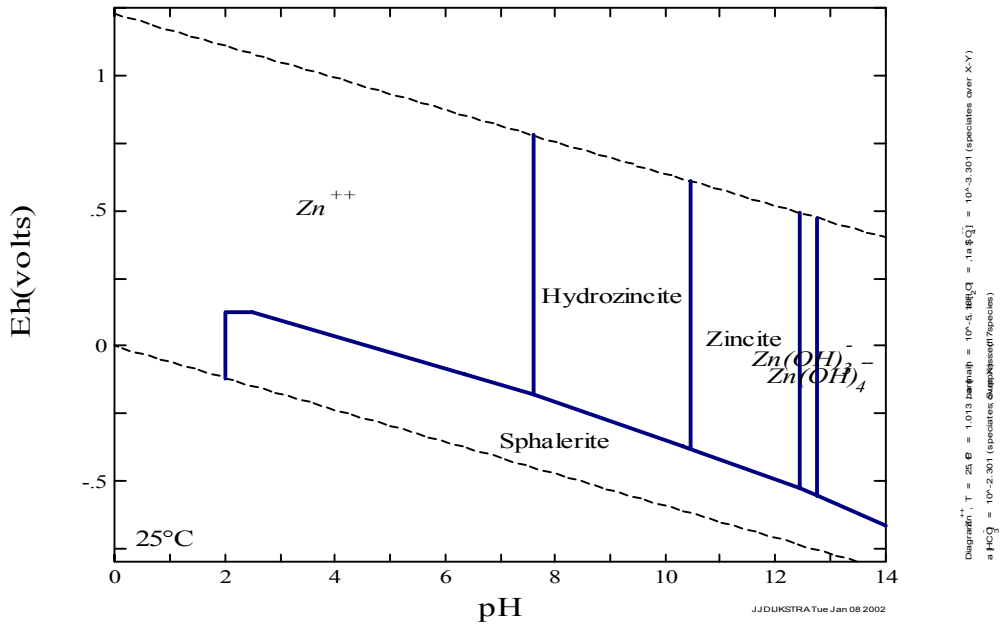
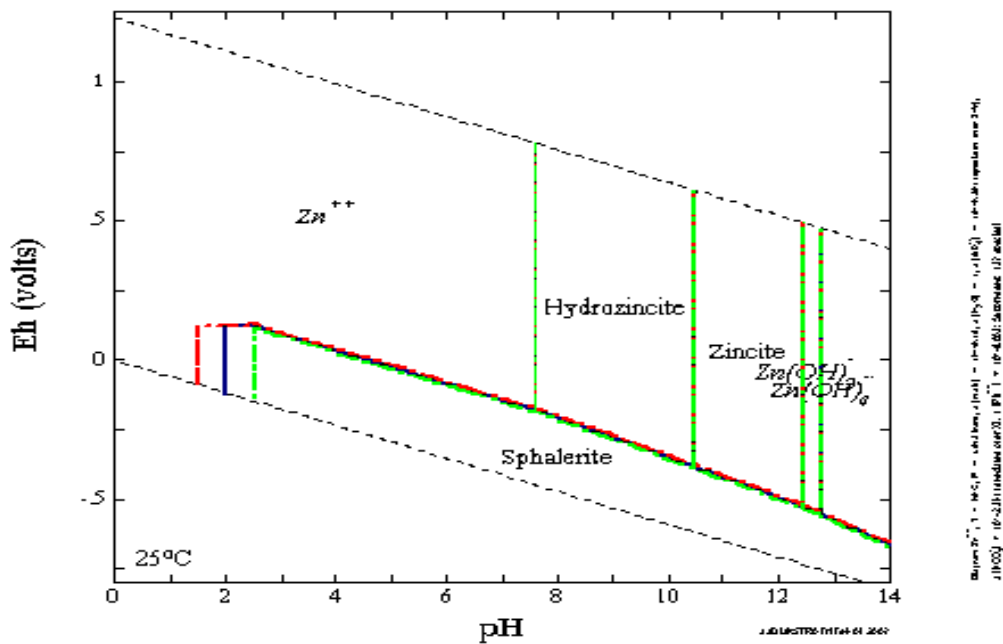


Fig. B1. pH/Eh diagram van Zn bij “gemiddelde” grondwatersamenstelling ($\text{SO}_4 = 5\text{e-}4 \text{ M}$, $\text{CO}_3 = 5\text{e-}3 \text{ M}$) en bij 25 graden Celsius. Activiteit van Zn is vastgelegd op de T-waarde grondwater ($6.61\text{E-}6 \text{ M}$). Sphalerite = ZnS , Hydrozincite = $\text{Zn}(\text{OH})_{1.2}(\text{CO}_3)_{0.4}$, Zincite =



ZnO.

Fig. B2. pH/Eh diagram van Zn bij “gemiddelde” grondwatersamenstelling ($\text{SO}_4 = 5\text{e-}4 \text{ M}$, $\text{CO}_3 = 5\text{e-}3 \text{ M}$) zoals in figuur A1. De groene lijnen ontstaan wanneer $\text{SO}_4 = 5\text{e-}5 \text{ M}$ wordt gehanteerd in de berekeningen, de rode lijn bij $\text{SO}_4 = 5\text{e-}3 \text{ M}$.

As

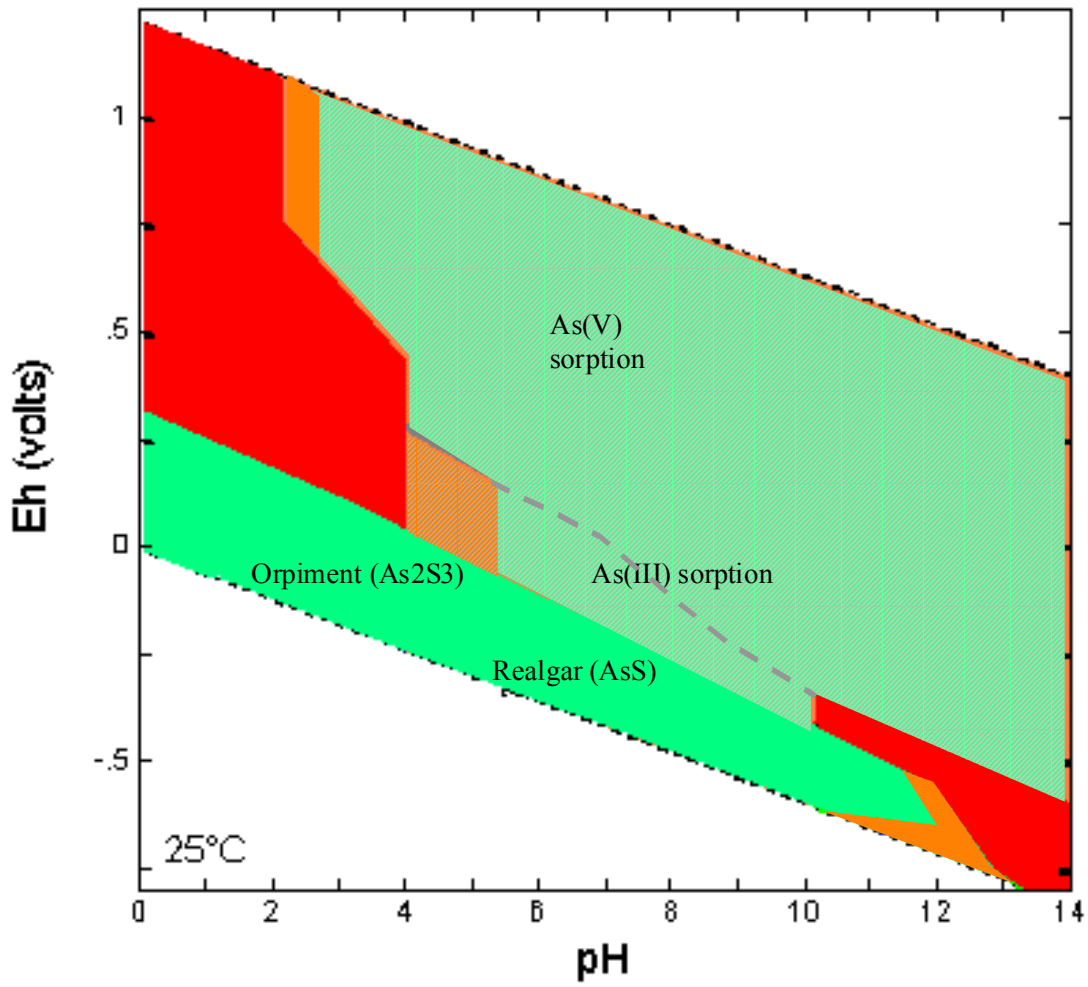


Fig. B3. Vastleggingsindicator arseen.

Cr

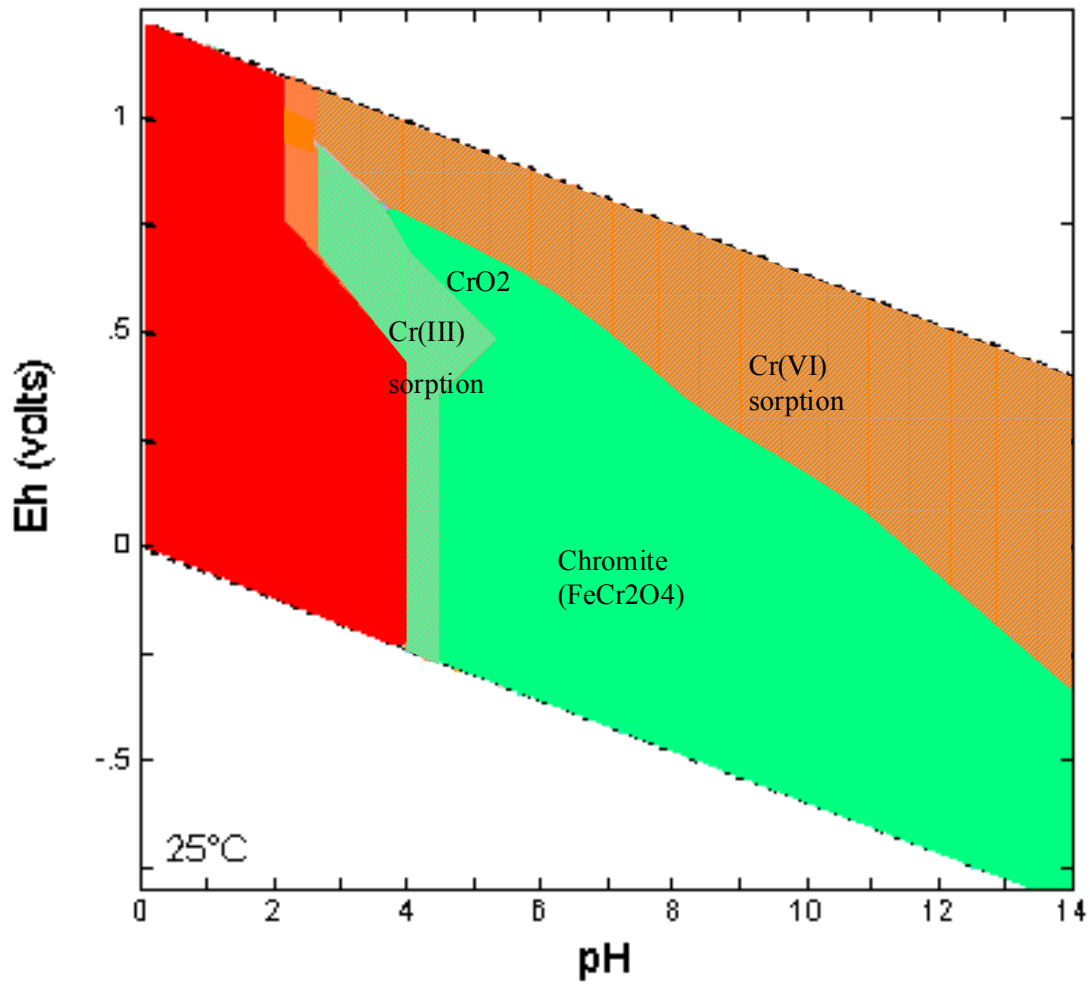


Fig. B4. Vastleggingsindicator chrom.

Ni

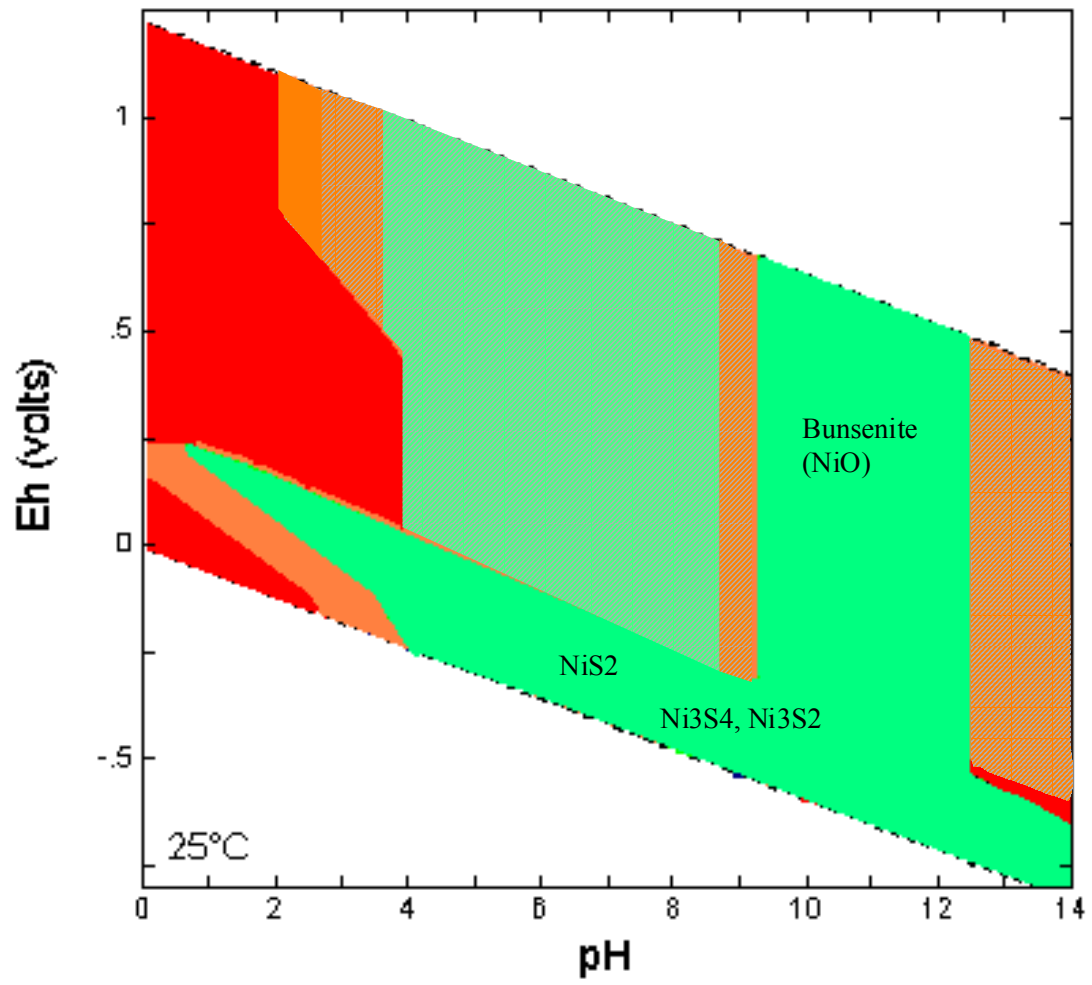


Fig. B5. Vastleggingsindicator nikkel.

Cd

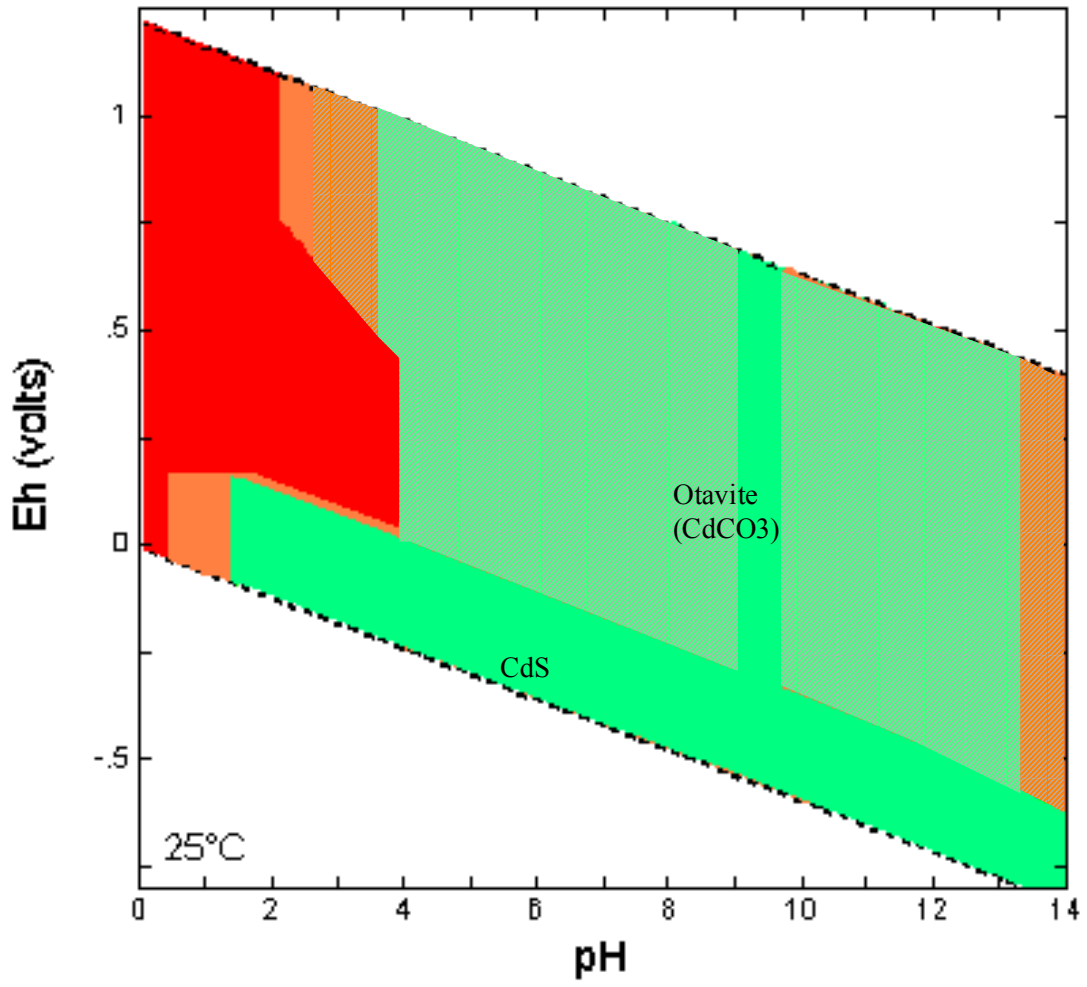


Fig. B6. Vastleggingsindicator cadmium.

Cu

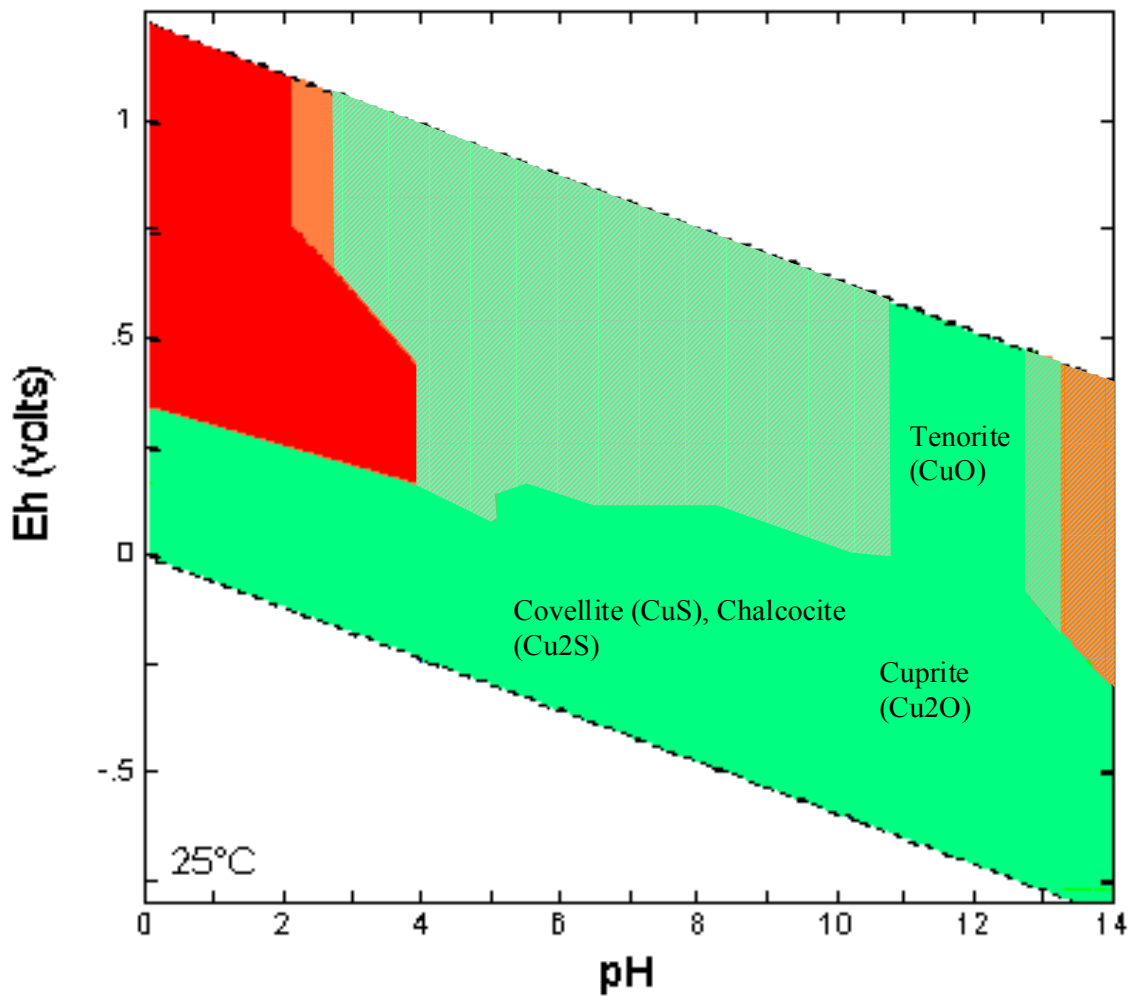


Fig. B7. Vastleggingsindicator koper.

BIJLAGE C

**STOF- EN PH-AFHANKELIJKE COËFFICIËTEN OM VASTLEGGING
TE BEREKENEN**

Tabel C1. pH- en stofafhankelijke coëfficiënten om vastlegging te berekenen (i. metaalkationen).

NB.: de coëfficiënten "C" voor organische stof zijn gecorrigeerd voor 50% reactiviteit.

pH	Zn			Cu			Pb			Cd			Ni		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
3.5	0.02	-	0.44	-	-	4.89	-	0.01	0.17	-	-	0.01	-	-	0.07
4	0.21	-	2.73	0.02	-	20.58	0.02	0.09	0.83	-	-	0.04	0.02	-	0.41
4.5	0.32	-	7.11	0.03	0.03	45.59	0.03	1.07	2.09	-	-	0.11	0.03	-	1.05
5	0.32	0.04	12.66	0.03	0.31	74.40	0.03	7.83	3.86	-	-	0.21	0.03	-	1.90
5.5	0.31	0.32	19.00	0.03	2.23	99.76	0.02	16.59	5.76	-	-	0.35	0.03	0.01	2.82
6	0.29	1.45	24.52	0.02	8.11	114.21	0.01	19.84	6.36	-	-	0.54	0.02	0.03	3.17
6.5	0.26	4.14	28.29	0.01	25.87	116.14	-	24.60	5.10	-	0.01	0.78	0.01	0.06	2.37
7	0.22	16.42	30.67	-	60.56	110.99	-	37.09	3.53	-	0.03	1.12	-	0.10	1.37
7.5	0.15	53.56	30.98	-	93.50	106.66	-	63.66	2.38	-	0.10	1.53	-	0.22	0.76
8	0.06	77.71	27.88	-	108.97	106.46	-	84.36	1.59	-	0.23	1.85	-	0.32	0.45
8.5	0.01	55.26	23.90	-	101.83	108.61	-	62.92	1.01	-	0.24	1.99	-	0.22	0.29
9	-	19.66	21.57	-	71.85	109.28	-	35.09	0.58	-	0.22	2.02	-	0.11	0.20
9.5	-	6.92	20.36	-	36.99	106.25	-	23.27	0.32	-	0.28	2.07	-	0.06	0.14
10	-	4.04	19.89	-	16.97	99.43	-	20.00	0.19	-	0.44	2.27	-	0.05	0.11
10.5	-	2.99	19.13	-	6.52	81.51	-	19.30	0.15	-	0.75	2.63	-	0.06	0.10
11	-	1.37	14.89	-	1.30	48.20	-	18.70	0.10	-	1.16	2.92	-	0.08	0.10
11.5	-	0.19	8.57	-	0.09	20.74	-	12.25	0.02	-	1.01	2.45	-	0.08	0.09
12	-	0.01	3.91	-	-	7.04	-	0.68	-	-	0.26	1.09	-	0.01	0.03
12.5	-	-	1.46	-	-	1.95	-	0.01	-	-	0.03	0.32	-	-	0.01
13	-	-	0.46	-	-	0.46	-	-	-	-	-	0.08	-	-	-
13.5	-	-	0.14	-	-	0.11	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-

Tabel C2. pH- en stofafhankelijke coëfficiënten om vastlegging te berekenen (redox gevoelige elementen en oxyanionen).

NB.: de coëfficiënten "C" voor organische stof zijn gecorrigeerd voor 50% reactiviteit.

pH	AsO3			AsO4			Cr+++			CrO4			MoO4		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
3.5	-	0.01	-	-	0.86	-	-	-	51.04	-	-	-	-	0.05	-
4	-	0.03	-	-	0.98	-	-	0.32	127.15	-	-	-	-	0.26	-
4.5	-	0.07	-	-	0.95	-	-	2.95	173.16	-	-	-	-	0.29	-
5	-	0.18	-	-	0.90	-	-	4.66	195.00	-	-	-	-	0.18	-
5.5	-	0.40	-	-	0.84	-	-	4.84	202.76	-	-	-	-	0.08	-
6	-	0.86	-	-	0.81	-	-	4.86	198.00	-	-	-	-	0.04	-
6.5	-	1.82	-	-	0.92	-	-	4.86	182.49	-	-	-	-	0.02	-
7	-	3.92	-	-	1.65	-	-	4.86	161.04	-	0.01	-	-	0.01	-
7.5	-	7.96	-	-	4.58	-	-	4.86	138.81	-	0.02	-	-	0.01	-
8	-	11.58	-	-	13.48	-	-	4.86	117.59	-	0.02	-	-	0.01	-
8.5	-	9.38	-	-	33.48	-	-	4.85	95.92	-	0.03	-	-	0.01	-
9	-	4.48	-	-	52.25	-	-	4.84	72.28	-	0.04	-	-	0.01	-
9.5	-	1.29	-	-	59.88	-	-	4.76	48.13	-	0.03	-	-	0.01	-
10	-	0.23	-	-	61.07	-	-	4.33	27.40	-	0.01	-	-	-	-
10.5	-	0.03	-	-	59.90	-	-	2.26	13.00	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	57.30	-	-	0.29	5.12	-	-	-	-	-	-
11.5	-	-	-	-	51.77	-	-	0.02	1.75	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	40.93	-	-	-	0.55	-	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	23.58	-	-	-	0.17	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	6.25	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-
13.5	-	-	-	-	0.69	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-

BIJLAGE D

**ECN-RAPPORT
“ONTWIKKELING VAN DE VASTLEGGINGSINDICATOR EN DE
STABILITEITSINDICATOR”
EN EXCEL WORKSHEETS**