

~~Hans Vermeulen~~

~~25/2/97~~

Marijke  
teasnoot

# Klimaatverandering en bodemdaling: gevolgen voor de waterhuishouding van Nederland

Resultaten van een onderzoek in het kader van de voorbereidingen  
van de vierde Nota waterhuishouding

uitgevoerd door de Werkgroep klimaatverandering en bodemdaling

's-Gravenhage, juli 1997



## VOORWOORD

In de Vervolgnota Klimaatverandering (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1996) is in het kader van de vierde Nota waterhuishouding de volgende passage van belang: "Gezien de potentieel ingrijpende gevolgen van klimaatverandering voor ons land, acht de regering het gewenst regelmatig de noodzaak tot het voorbereiden van adaptatieve maatregelen te bezien. In de relevante beleidsnota's voor kustbeheer en waterhuishouding en in beschouwingen voor de beleidsterreinen van landbouw en natuurbeheer zal daaraan aandacht worden gegeven. Ook zal worden ingegaan op de lacunes in kennis die een belemmering vormen voor de ontwikkeling van adaptatie en de wijze hoe daar mee omgegaan moet worden."

Bodemdalings en zeespiegelstijging, mede ten gevolge van klimaatverandering, hebben op de lange termijn eveneens consequenties voor de waterhuishouding, met name in laag Nederland. Net als klimaatverandering voltrekken deze ontwikkelingen zich langzaam maar gestaag. Bovendien lijken deze onomkeerbare processen zich autonoom te voltrekken. Voorzover hier menselijk handelen aan ten grondslag ligt, is directe beïnvloeding door de waterbeheerder beperkt.

Ten behoeve van de vierde Nota waterhuishouding zijn mogelijke ontwikkelingen ten aanzien van klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdalings en gevolgen voor de waterhuishouding van de Nederlandse watersystemen in kaart gebracht. Hierbij is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van beschikbare kennis en onderzoeksresultaten. Door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut en het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling is aanvullend onderzoek verricht.

Met deze rapportage wordt beoogd een aantal fysische randvoorwaarden en consequenties te schetsen waarmee het waterbeheer en de ruimtelijke ordening rekening moeten houden bij de invulling van Nederland in de 21<sup>e</sup> eeuw. Daarbij wordt opgemerkt dat een kwantitatieve inschatting van de ontwikkelingen met de nodige aannamen gepaard gaat. Onder meer binnen het Ministerie van Verkeer en Waterstaat wordt momenteel onderzoek gedaan naar toekomstige klimaatveranderingen en de mogelijke gevolgen daarvan voor het waterhuishouding in Nederland. Door de verwachte voortgang in het onderzoek dienen de in deze rapportage gepresenteerde resultaten als een eerste verkenning beschouwd te worden.

De Werkgroep klimaatverandering en bodemdalings - NW4



## INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING . . . . .	- 1 -
1. INLEIDING . . . . .	- 7 -
1.1 Aanleiding en doel . . . . .	- 7 -
1.2 Uitgangspunten en werkwijzen . . . . .	- 8 -
1.3 Opbouw van het rapport . . . . .	- 9 -
2. KLIMAATVERANDERING EN BODEMDALING . . . . .	- 11 -
2.1 Klimaatverandering . . . . .	- 11 -
2.2 Zeespiegelstijging en stormvloeden . . . . .	- 15 -
2.3 Bodemdaling . . . . .	- 16 -
3. RIVIEREN EN IJsselmeer . . . . .	- 23 -
3.1 Rivieren . . . . .	- 23 -
3.1.1 Huidige situatie . . . . .	- 23 -
3.1.2 Veranderingen . . . . .	- 24 -
3.1.3 Gevolgen voor de functies . . . . .	- 26 -
3.1.4 Maatregelen . . . . .	- 29 -
3.2 Benedenrivierengebied . . . . .	- 30 -
3.3 IJsselmeer . . . . .	- 33 -
3.3.1 Huidige situatie . . . . .	- 33 -
3.3.2 Veranderingen . . . . .	- 34 -
3.3.3 Gevolgen voor de functies . . . . .	- 35 -
3.3.4 Maatregelen . . . . .	- 35 -
4. REGIONALE WATERSYSTEMEN . . . . .	- 37 -
4.1 Beeksystemen . . . . .	- 39 -
4.1.1 Huidige situatie . . . . .	- 39 -
4.1.2 Veranderingen . . . . .	- 39 -
4.2 Poldersystemen . . . . .	- 41 -
4.2.1 Huidige situatie . . . . .	- 41 -
4.2.2 Veranderingen . . . . .	- 43 -
4.3 Gevolgen voor de functies . . . . .	- 48 -
4.4 Maatregelen . . . . .	- 50 -
5. KUSTSYSTEMEN . . . . .	- 53 -
5.1 Huidige situatie . . . . .	- 53 -
5.2 Veranderingen . . . . .	- 54 -
5.3 Gevolgen voor de functies . . . . .	- 54 -
5.4 Maatregelen . . . . .	- 56 -
6. KENNISLEEMTEN EN ONDERZOEK . . . . .	- 57 -
6.1 Randvoorwaarden . . . . .	- 57 -
6.2 Waterhuishouding . . . . .	- 58 -
6.3 Lopend onderzoek . . . . .	- 59 -
7. CONCLUSIES . . . . .	- 61 -
LITERATUUR . . . . .	- 62 -
BIJLAGEN . . . . .	- 65 -
Bijlage 1 KNMI-scenario . . . . .	- 65 -
Bijlage 2 UKHI-scenario . . . . .	- 68 -
Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in 2050 . . . . .	- 69 -
Bijlage 4 Ontwikkelingsvarianten regionale watersystemen . . . . .	- 70 -
Bijlage 5 Werkgroep klimaatverandering en bodemdaling - NW4 . . . . .	- 71 -



## **SAMENVATTING**

Ter voorbereiding van de vierde Nota waterhuishouding zijn mogelijke ontwikkelingen ten aanzien van klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdaling in relatie tot de waterhuishouding van de Nederlandse watersystemen in beeld gebracht. Hierbij is gebruik gemaakt van beschikbare gegevens en onderzoeksresultaten. Daarnaast is ten behoeve van de NW4 nog aanvullend onderzoek gedaan naar enkele klimatologische aspecten en naar de effecten voor de regionale watersystemen.

Waterbeheersing is voor Nederland een essentiële voorwaarde voor het bewonen en gebruiken van het land. Het klimaat, de zeespiegel en de hoogte van het maaiveld zijn belangrijke randvoorwaarden voor de waterhuishouding. Veranderingen in deze randvoorwaarden kunnen op de lange termijn grote gevolgen hebben voor het waterbeheer en/of het landgebruik in Nederland.

### **Klimaatverandering en bodemdaling**

Hoewel er omtrent klimaatverandering en, in mindere mate, zeespiegelstijging nog een grote mate van onzekerheden bestaat, kan op grond van bestaande meetreeksen geconcludeerd worden dat mondiale temperatuur- en zeespiegelstijging zich in de komende eeuw waarschijnlijk zullen voortzetten. Voor Nederland zal de systematische opwarming de komende decennia slechts geleidelijk zichtbaar worden, maar in 2050 merkbaar aanwezig zijn. De gemiddelde temperatuur zal dan met 0,5-2°C zijn toegenomen, en de gemiddelde jaarlijkse neerslag ten gevolge hiervan met 2 tot 5% stijgen, waarbij de toename zich concentreert in de winter. De relatieve zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust zal naar verwachting ten opzichte van 1990 in 2050 circa 25 cm bedragen.

In tegenstelling tot klimaatverandering is de bodemdaling in Nederland goed in te schatten. De bodemdaling kent drie hoofdoorzaken.

- Klink en oxydatie als gevolg van ontwatering veroorzaken in klei- en veengebieden een bodemdaling van 10 à 45 cm in 2050. In Zuidelijk Flevoland zijn in die periode nog dalingen te verwachten tussen de 10 en de 70 cm als gevolg van het rijpingsproces.
- Aardgaswinning in Groningen en Friesland geeft een maximale daling van 36 cm in het gebied rond Loppersum en ongeveer 25 cm in de buurt van het Lauwersmeer.
- Tektonische bewegingen leiden in 2050 in het noordwesten van Nederland tot een maximale daling van 5 cm en in het zuidoosten tot een maximale stijging van 5 cm.

### **Rivieren**

Als gevolg van klimaatverandering zullen extreme afvoeren, zowel hoge als lage, frequenter voorkomen. De rivierdynamiek wordt groter; gemiddelde afvoeren veranderen naar verwachting weinig. In de loop van de komende eeuw zullen de maatgevende afvoeren van de Rijn en Maas stijgen. Dit maakt een verdere vergroting van de afvoer- en bergingscapaciteit van de rivieren noodzakelijk om aan de veiligheidssnormen te kunnen blijven voldoen.

Voor de zomerperiode zal de binnenvaart op het traject Rotterdam-Basel hinder ondervinden van het vaker en langduriger optreden van lage afvoeren. Eveneens zal de watervoorziening voor regionale wateren (peilhandhaving, doorspoelen) en industrie (koelwater) nadelige effecten ondervinden van toenemend lage rivieraafvoeren.

Voor de natuur zijn de effecten minder ingrijpend en niet per se negatief. Een grotere rivierdynamiek lijkt gunstig voor de natuur in het winterbed, en zeker ook voor het streefbeeld. Meer perioden met lage afvoer in de zomer is echter ongunstig voor de natuur in het streefbeeld, omdat in vergelijking met de huidige omstandigheden een groter areaal aan natte ecotopen nadelige effecten van droogte zal ondervinden.

Het beleid 'Ruimte voor de Rivier' (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995) is een goede strategie voor de mogelijke gevolgen van klimaatverandering, en de onzekerheden die daar nu nog aan kleven. Het is belangrijk nu al extra ruimte te reserveren, wat de mogelijkheid biedt om deze later te benutten.

Voor de scheepvaart zijn vaarwegverbeteringen als Hoofd Transport As Waal effectief om een deel van de laagwaterbeperkingen bij klimaatverandering op te vangen. Daarnaast zullen maatregelen bij de binnenscheepvaart zelf kunnen liggen in onder andere een verdere flexibiliteit van het transportsysteem, en het aanpassen van de vloot.

### **Benedenrivierengebied**

De zeespiegelstijging zal zowel de water- en zoutbeweging, als morfologie van het benedenrivierengebied beïnvloeden. Indien het beheer van de Haringvlietsluizen wordt aangepast, zal dit de veranderingen voor een groot deel bepalen.

De gevolgen voor de veiligheid zijn nog niet duidelijk omdat deze mede van stormfrequenties afhangen, waarover nog te weinig bekend is. Indicatieve berekeningen geven aan dat bij het huidige spuibehoorde de maatgevende waterstanden met enkele decimeters zouden kunnen toenemen.

Een verdere zoutindringing, in combinatie met lagere rivieraafvoeren in de zomer leidt tot beperkingen van de waterinname vanuit het benedenrivierengebied. Het intergetijdegebied zal stroomopwaarts verschuiven.

Door sedimentatie zal de rivierbedding zich geleidelijk aanpassen aan de hogere waterstanden.

### **IJsselmeer**

De zeespiegelstijging is (van de genoemde ontwikkelingen) de belangrijkste factor voor de waterhuishouding van het IJsselmeer en het Noordzeekanaal. Door de zeespiegelstijging neemt de spuicapaciteit van de sluizen af. Hierdoor zal met name in de winterperiode zonder extra maatregelen het huidige peilbeheer niet meer te handhaven zijn. Stijging van het winterpeil heeft nadelige gevolgen voor de veiligheid.

Tijdens de zomermaanden zal een grotere watervraag van de omliggende gebieden in combinatie met een lagere aanvoer van water via de IJssel vaker tot onderschrijding van het streefpeil leiden.

Het toekomstige peilbeheer van het IJsselmeer kan niet los gezien worden van de waterhuishouding in de omliggende gebieden. Daarom worden maatregelen voor een gewenst peilbeheer en hun gevolgen voor de functies van het IJsselmeergebied, ook bij veranderd klimaat, door Rijkswaterstaat in een brede studie verkend.

## **Regionale systemen**

### **Effecten van bodemdaling**

Als gevolg van bodemdaling zal het zoutbezuur in laag Nederland substantieel toenemen. Bovendien zal door bodemdaling de stabiliteit van de boezemkeringen afnemen en zal schade aan infrastructuur en bebouwing toenemen. Onderzoek naar de waterhuishoudkundige inrichting heeft aangetoond dat met name op lokaal niveau de effecten aanmerkelijk kunnen zijn.

### **Effecten van bodemdaling in combinatie met een versterkt broeikaseffect**

De bodemdaling in combinatie met klimaatverandering en zeespiegelstijging heeft aanzienlijke effecten op de waterhuishouding in Nederland. De grootste effecten worden veroorzaakt door de toename van de netto neerslag. De zeespiegelstijging en de verandering van peilen in het IJsselmeer en de grote rivieren zijn vooral merkbaar in de directe nabijheid van deze wateren.

De gebiedsafvoer neemt toe. In hoog Nederland is de toename ruwweg evenredig met de verwachte toename in de neerslag. In laag Nederland neemt de gebiedsafvoer als gevolg van bodemdaling, zeespiegelstijging en peilveranderingen in het IJsselmeer en de grote rivieren meer toe.

Piekafvoeren in stedelijk gebied zullen merkbaar toenemen; zonder maatregelen zal dit leiden tot frequenter overstortingen van de rioleringsstelsels. Grondwaterstandverhoging treedt over grote oppervlakten op, maar bedraagt in het algemeen minder dan 20 cm. Veranderingen in kwel- en wegzijging treden verspreid over het land op, in het algemeen worden zowel de kwel- als de wegzijging groter.

De effecten van het versterkte broeikaseffect op het zoutbezuur ten gevolge van kwel in diverse polders is minder dan bij de verwachte bodemdaling. In laaggelegen kustgebieden met brak/zout grondwater in de ondergrond kan een verdere zeespiegelstijging tot een toename van het zoutbezuur leiden (bijv. Zeeland en het gebied tegen de Waddenzee), terwijl in andere gebieden door het toegenomen neerslagoverschot het zoutbezuur afneemt (bijv. Hollands duingebied).

Voor de landbouw ligt de berekende extra opbrengstderving als gevolg van natschade in de orde van f 45 miljoen per jaar op een gemiddelde opbrengstderving door droogte- en natschade van f 1,3 miljard per jaar in de huidige situatie.

Het netto effect op de grondwaterafhankelijke, semi-terrestrische natuur komt overeen met de uitvoering van ongeveer 10% van alle mogelijke waterhuishoudkundige maatregelen voor herstel van de natuurwaarden.

## **Kust**

Zeespiegelstijging en mogelijke veranderingen in het windklimaat veroorzaken veranderingen in stromingspatronen en beïnvloeden daarmee de sedimentatie- en erosieprocessen langs de kust. Voor de Waddenzee is het de vraag of de sedimentatie de zeespiegelstijging kan bijhouden, intergetijdegebieden kunnen onder water komen te staan.

Bij het ontwerpen van de grote infrastructurele werken van het Deltaplan is rekening gehouden met een zeespiegelstijging in de orde van 60 cm per eeuw gedurende de levensduur. De stabiliteit van de zeeweringen is in beginsel hiermee gegarandeerd.

Dynamisch kustbeheer is een goede beheerstrategie om te kunnen anticiperen op de gevolgen van klimaatverandering en de daarmee samenhangende zeespie-

gelstijging. Om de vereiste veiligheid te kunnen blijven garanderen is daarbij essentieel dat aan de zeezijde de hoeveelheid zand in het kustsysteem op niveau blijft en aan de landzijde voldoende ruimte gereserveerd wordt voor de natuurlijke, dynamische processen.

Bij een zeespiegelstijging van 60 cm/eeuw is in totaal 7 miljoen m<sup>3</sup> zand per jaar extra nodig, bovenop het huidige suppletieniveau van 6 miljoen m<sup>3</sup>, om ook het zandverlies op dieper water te compenseren.

Effecten op de natuur zijn nog onduidelijk. In ondiepe getijdewateren, zoals de Waddenzee, zal verdieping over het algemeen leiden tot een afname van de biodiversiteit. Daarbij hebben snelle morfologische veranderingen negatieve gevolgen voor het leefklimaat van deze gebieden. Daarnaast is de temperatuur bepalend voor de verspreidingsgebieden van organismen.





## 1. INLEIDING

### 1.1 Aanleiding en doel

Het in grote mate kunnen beheersen van de waterhuishouding is voor Nederland een essentiële voorwaarde voor het kunnen bewonen en gebruiken van het land, zoals dat naar de huidige maatstaven gewenst is. Zonder waterkeringen staat tweederde van Nederland onder water (zie kaart 1) en wordt een investering van zo'n f 2.500 miljard bedreigd (Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1992).

Maar in bijna hetzelfde gebied zouden zonder wateraanvoer van buitenaf watertekorten optreden gedurende de zomermaanden. Nederland is wat betreft zijn watervoorziening gedurende een 'gemiddelde' zomer voor meer dan de helft afhankelijk van rivieraanvoeren uit het buitenland (Commissie Hydrologisch Onderzoek, 1989).

Kaart 1: Overstroombaar gebied in Nederland



Klimaat, zeespiegelstand en maaiveldhoogteligging zijn belangrijke voorwaarden voor de waterhuishouding. Trendmatige veranderingen daarin zullen consequenties hebben voor de waterhuishouding van (delen van) Nederland. Deze veranderingen in de waterhuishouding kunnen vervolgens gevolgen hebben voor diverse functies die belang hebben bij een bepaalde waterhuishoudkundige situatie. De processen en de veranderingen doen zich op verschillende schaal voor. Zo zijn klimaatverandering en zeespiegelstijging processen die zich vooral mondiaal voltrekken, die regionaal verschillende gevolgen kunnen hebben, terwijl bodemdaling meer een lokaal fenomeen is. Daarbij veroorzaakt het verschil in bodemgesteldheid en waterhuishouding grote lokale verschillen in effecten.

Ten behoeve van de vierde Nota waterhuishouding (NW4) is het gewenst een beeld te schetsen van de lange-termijnontwikkelingen. Het doel hiervan is aan te geven in hoeverre deze ontwikkelingen mogelijkheden geven dan wel beperkingen opleggen aan maatschappelijke ontwikkelingen, met name grondgebruik in relatie tot veiligheid en watervoorziening. Een vertaling in concrete maatregelen is in dit verband minder relevant, omdat eerst duidelijk moet zijn welk grondgebruik en de daarmee samenhangende waterhuishouding gewenst is. Daar waar beleidslijnen zijn gekozen, zoals in 'Ruimte voor de Rivier' (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996) kunnen maatregelen nader uitgewerkt worden, zoals deze thans in de uitwerking 'Ruimte voor de Rijntakken' door Rijkswaterstaat worden voorbereid.

## 1.2 Uitgangspunten en werkwijzen

Binnen het waterhuishoudkundige systeem van Nederland worden zes subsystemen onderscheiden:

- de grote rivieren;
- het benedenrivierengebied;
- het IJsselmeer, incl. Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal;
- regionale rivieren en beeksystemen (hoog Nederland);
- boezem- en poldersystemen (laag Nederland);
- kustwateren.

De waterhuishouding van deze systemen is nauw met elkaar verbonden. De afvoer vanuit de rivieren Rijn en Maas, en in mindere mate van kleinere rivieren als de Overijsselse Vecht bepalen de hoeveelheid water die over de watersystemen van Nederland verdeeld wordt. De neerslag, de zeespiegel en de rivieraafvoeren bepalen de waterstanden, waterbeweging en zoutindringing in de benedenrivieren en het IJsselmeer. Ook tussen de regionale systemen en de (grote) wateren bestaat een nauwe relatie. In natte perioden met een neerslagoverschot wordt het overtollige water via drainagebuizen, greppels, sloten, beken en kanalen afgevoerd naar de grote wateren. In perioden van droogte (neerslagtekort) wordt in een groot deel van laag Nederland water ingenomen uit de grote wateren. Dit is niet alleen voor landbouwkundige doeleinden (veedrenking en gewasproductie) van belang, maar ook voor de handhaving van de polderpeilen (oxydatie en inklinking) en voor doorspoeling (verziltings- en eutrofiëeringsbestrijding). Het IJsselmeer is belangrijk als zoet waterreservoir, zowel in perioden met wateroverschot als in perioden met watertekort, voor het waterbeheer in de provincies Friesland, Groningen, Drenthe, Overijssel en Noord-Holland.

Deze rapportage is samengesteld door de Werkgroep klimaatverandering en bodemdaling - NW4 (zie bijlage 5). De werkzaamheden betroffen in de eerste plaats een inventarisatie van onderzoeksresultaten en beschikbare gegevens. Belangrijke bronnen in dit verband zijn geweest Second Assessment Report van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1995), De toestand van het klimaat in Nederland (Können en Fransen, 1996), Impact of Sea Level Rise on Society (Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1991), Integrale Verkenningen Inrichting Rijntakken (Silva en Kok, 1996), 'Onderzoek Waterhuishoudkundige Inrichting Friesland' (Van der Meij, et al, 1994) en Kustbalans 1995 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996).

Daarnaast heeft het KNMI ten behoeve van de NW4 onderzoek gedaan naar een aantal, voor de waterhuishouding van belang zijnde, meteorologische grootheden (Können et al, 1997). Ook heeft het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) op basis van de KNMI-gegevens

voor deze NW4-rapportage aanvullende modelberekeningen uitgevoerd voor de regionale watersystemen (Vermulst et al, 1997).

Gekozen is voor het inschatten van de veranderingen rond 2050 met een door-kijk naar 2100.

### 1.3 Opbouw van het rapport

In hoofdstuk 2 worden de ontwikkelingen ten aanzien van klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdaling beschreven. Hierbij wordt ingegaan op veranderingen die zich in Nederland en/of mondiaal hebben voorgedaan. Vervolgens worden mogelijke ontwikkelingen in de komende eeuw beschreven.

Hoofdstukken 3, 4 en 5 beschrijven de gevolgen die deze ontwikkelingen hebben op de onderscheiden watersystemen binnen Nederland. Hierbij worden de huidige situatie en veranderingen aangegeven. Tevens worden mogelijke richtingen aangegeven waarmee op de gesignaleerde ontwikkelingen geanticipeerd kan worden. Voor een deel zijn dit reeds beleidsvoornemens of al bestaande praktijk, gedeeltelijk zijn deze nog in ontwikkeling.

Hoofdstuk 6 geeft zowel voor de ontwikkelingen als voor de watersystemen aan in hoeverre leemten in kennis bestaan en in hoeverre hier via onderzoek op geanticipeerd wordt.

In hoofdstuk 7 zijn de belangrijkste conclusies samengevat.



## 2. KLIMAATVERANDERING EN BODEMDALING

### 2.1 Klimaatverandering

#### Recente klimaatverandering

Van diverse meteorologische grootheden zijn lange meetreeksen beschikbaar. Die tonen dat het klimaat van Nederland voortdurend varieert. Deze variaties zijn gekoppeld aan afwijkingen van de gemiddelde atmosferische stromingen. Hierbij lopen grillige jaar-op-jaar fluctuaties en trage fluctuaties door elkaar. De toevalligheid van de dagelijks wisselende toestand van deze stromingen bepaalt de jaar-op-jaar fluctuaties; de systematische afwijkingen van deze stromingen, samenhangend met trage processen in de oceaan, bepalen de trage fluctuaties.

Door de specifieke ligging van Nederland, met aan de westkant een oceaan en aan de oostkant een groot continent, hangt het Nederlandse weer zeer gevoelig af van de richting van de luchtstromingen; aanvoer van koude of warme, c.q. droge of vochtige, lucht uit andere streken. De voortdurende afwisseling hierin leidt tot een klimaat dat zich kenmerkt door uiterst variabel weer.

Een versterking van het IJslandse lagedrukgebied gedurende het laatste decennium veroorzaakte een afwijkende gemiddelde toestand van de luchtstromingen. Hierdoor toont een aantal meteorologische grootheden, met name temperatuur en neerslag, de laatste jaren afwijkingen ten opzichte van het voorafgaande deel van de eeuw. Niet bekend is of het versterkte broeikaseffect een rol heeft gespeeld bij het versterken van het IJslandse lagedrukgebied (Können en Fransen, 1996).

Mondiaal gezien is er sprake geweest van een opwarming, vooral in de afgelopen twintig jaar. Deze stijging bedraagt slechts een derde van de Nederlandse temperatuurstijging. De wereldgemiddelde temperatuur kent echter een lage natuurlijke variabiliteit. De mondiale temperatuurstijging heeft nu een niveau bereikt dat zij niet meer volledig aan natuurlijke oorzaken lijkt te kunnen worden toegeschreven (IPCC, 1995).

#### Toekomstige klimaatverandering - mondiaal

Uitgaande van een bekend verondersteld verloop in de toekomstige atmosferische samenstelling zijn klimaatmodellen, General Circulation Models (GCM's), in staat een indruk te geven van toekomstige patronen van temperatuur- en neerslagverandering op zeer grote ruimtelijke schaal. Het IPCC heeft in 1996 de kennis van het toekomstige klimaat in kaart gebracht en neergelegd in het Tweede Integrale IPCC-rapport over klimaatverandering. Dit rapport vormt het ijkpunt bij het doen van klimaatvoorspellingen.

Op grond van aannames over bevolkingsgroei, industriële ontwikkeling en energieverbruik heeft het IPCC zes scenario's opgesteld voor het verloop van de emissies van broeikasgassen en van industriële deeltjes (aërosolen) tot eind volgende eeuw. Voor ieder scenario is het bijbehorende verloop in atmosferische samenstelling berekend. Ondanks reducties in verschillende emissescenario's leiden ze alle zes ertoe dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen, en in mindere mate die van aërosolen, in de 21<sup>e</sup> eeuw steeds hoger worden. Als uitgegaan wordt van een "gemiddeld" scenario, luiden de meest zekere voorspellingen van het IPCC-rapport voor het klimaat halverwege de volgende eeuw als volgt:

- De wereld-gemiddelde temperatuur zal in 2050 een halve tot 2 graden hoger zijn dan in 1990, met als centrale schatting één graad Celsius. De grootste opwarming zal optreden boven de continenten op hoge breedten en de opwarming zal het grootst zijn in het winterseizoen.
- Door naijl-effecten zal stabilisatie van klimaat pas zeer lange tijd na een eventuele stabilisatie van broeikasgasconcentraties plaats kunnen vinden.
- De wereldwijd-gemiddelde neerslag zal in 2050 met enkele procenten zijn toegenomen ten opzichte van 1990.
- De met de temperatuurstijging geassocieerde verhoging van het wereldgemiddelde zeespiegelniveau zal ten opzichte van 1990 in 2050 tien tot veertig centimeter bedragen, met als centrale schatting vijfentwintig centimeter relatieve zeespiegelstijging.

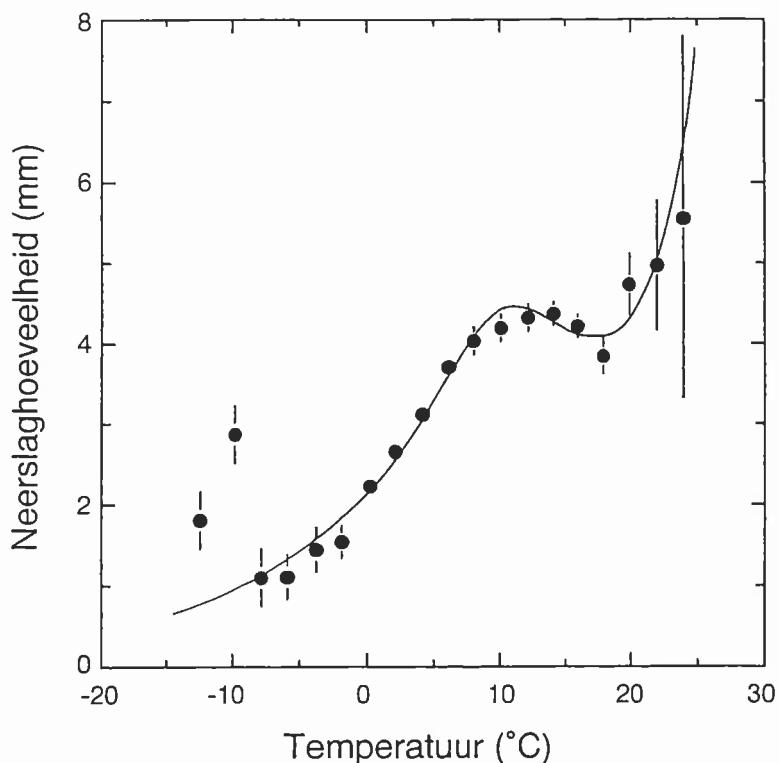
In het IPCC-rapport is ook gekeken naar emissiescenario's, die zo laag zijn dat ze leiden tot een stabilisatie van de concentraties van broeikasgassen in de loop van de komende eeuw. Zelfs de meest extreme scenario's blijken over een tijdvak van een eeuw tot een grotere temperatuurverandering te leiden dan zich de afgelopen 100 eeuwen heeft voorgedaan.

#### **Toekomstige klimaatverandering - Nederland**

De in het IPCC-rapport gepresenteerde voorspellingen zijn niet regelrecht op de Nederlandse situatie te projecteren. Waargenomen verbanden tussen de verschillende onderdelen van het Nederlandse weer verschaffen echter wel inzicht in de consequenties van een verandering in het ene onderdeel van het Nederlandse klimaat voor een ander onderdeel. Onder de aannname dat deze verbanden in het toekomstige klimaat ongewijzigd blijven, kan in principe op grond van uit het IPCC-rapport geschatte veranderingen van een beperkt aantal klimaatvariabelen voor Nederland een mogelijke realisatie van andere klimaatvariabelen van Nederland geschatst worden. Voor de Nederlandse waterhuishouding is met name de relatie tussen temperatuur en neerslag bruikbaar. Het KNMI heeft de in figuur 1 weergegeven empirische relatie gevonden tussen neerslag op dagen met neerslag en temperatuur. Deze relatie is gebruikt om neerslaghoeveelheden in Nederland op te schalen naar een toekomstig klimaat (De Wildt en Können, 1996).

Een centraal gegeven bij het opstellen van toekomstige klimaten voor Nederland wordt gevormd door inzicht in het toekomstige karakter van de luchtstromingen en in de toekomstige frequentie van optreden van atmosferische circulatiepatronen. Hoewel de uitkomsten van experimenten met klimaatmodellen wel aangeven dat de grootschalige atmosferische circulatie niet drastisch verandert, leveren zij geen bruikbaar signaal op over veranderingen in de luchtstromingen boven West-Europa. Bij gebrek aan deze informatie, gaat de hieronder gepresenteerde mogelijke realisatie van een toekomstig klimaat in Nederland uit van een aanname over dit cruciale gegeven. Hierbij wordt als sleutelaanname gesteld dat de variabiliteit van de luchtstromingen en de frequentieverdeling van circulatiepatronen rond Nederland zich bij versterking van het broeikaseffect niet zullen wijzigen.

fig.1 Relatie tussen de dag gemiddelde temperatuur en neerslag hoeveelheid op dagen met neerslag voor De Bilt.



Gegeven de breedtegraadafhankelijkheid van de mondiale temperatuurstijging is een plausibele schatting bij bovengenoemde sleutelaanname dat de temperatuurstijging in Nederland niet sterk zal afwijken van de wereldgemiddelde temperatuurstijging van 0,5-2°C. Uitgaande van deze temperatuurstijging ontstaat het volgende beeld van een mogelijk klimaat in Nederland in 2050 (Können en Fransen, 1996):

- De temperatuurverhoging van 0,5-2 graden zal in de winter iets sterker zijn dan in de zomer.
- De luchtstromingen en de opeenvolging van weertypen zullen net als nu gekenmerkt blijven door grote afwisseling. Binnen deze grilligheid zal de systematische opwarming de komende decennia slechts geleidelijk zichtbaar worden, maar in 2050 merkbaar aanwezig zijn.
- Een hittegolf blijft een verschijnsel dat gemiddeld slechts eens in de paar jaar optreedt. Gemeten naar de huidige normen zullen ze wel vaker voorkomen, iets langer duren en heviger zijn.
- Strenge winters worden zeldzamer en de strengste iets minder extreem, waarbij de kans op extreem lage temperaturen in het vroege voorjaar afneemt.
- De jaarlijkse neerslaghoeveelheid neemt toe met 2 tot 5%, waarbij de toename zich concentreert in de winter.
- De neerslaghoeveelheid in situaties met langdurige, hevige winterneerslag neemt toe met 5 tot 20%.
- In de zomer zal de neerslag een buiiger karakter krijgen, zodat de neerslag in kortere tijdsintervallen valt dan nu. De zwaarste buien worden heviger; de maximale neerslagintensiteit neemt met 5 tot 20% toe.
- De toename van de gemiddelde zomertemperatuur heeft een hogere potentiële

verdamping tot gevolg. Het is niet vanzelfsprekend dat dit leidt tot grotere neerslagtekorten, mede omdat het effect van de responsie van biomassa op CO<sub>2</sub> toename niet goed bekend is.

- Stormfrequenties en frequenties van neerslagloze perioden zijn direct gerelateerd aan specifieke circulatiepatronen. Over veranderingen hierin is binnen de sleutelaanname geen zinvolle uitspraak mogelijk.

Bovenstaand toekomstbeeld schetst één mogelijke realisatie van het Nederlandse klimaat in 2050; andere realisaties zijn evenzeer mogelijk. Indien de aanname waarop het bovenstaande KNMI-scenario berust niet houdbaar blijkt, of als er inzicht ontstaat over veranderingen in de frequentieverdeling van circulatiepatronen, zal het toekomstbeeld zich drastisch kunnen wijzigen. Naar het zich laat aanzien zal het toekomstbeeld stapsgewijs concreter worden naarmate aannamen vervangen worden door geconstateerde trends en klimaatmodellen gedetailleerder worden. Bijlage 1 toont de resultaten van een verder op deze rapportage toegespitst klimaatscenario.

#### Toekomstige klimaatverandering - Rijngebied

Om de effecten van klimaatveranderingen op de afvoer van de Rijn te bepalen zijn klimaatscenario's nodig die van toepassing zijn voor het gehele stroomgebied van de Rijn. Het KNMI-scenario geldt specifiek voor Nederland en de directe omgeving, en kan niet zonder meer voor het gehele Rijngebied toegepast worden. De empirische relaties tussen meteorologische variabelen waarop het KNMI-scenario gebaseerd is zullen voor Midden-Duitsland en het Alpiene deel van het Rijngebied anders zijn dan voor Nederland. Bovendien moet voor het afvoerprobleem ook de ruimtelijke correlatie in de klimaatscenario's meegenomen worden.

De hier gebruikte scenario's van klimaatveranderingen voor het Rijngebied zijn gebaseerd op uitkomsten van het zogeheten UKHI-experiment dat uitgevoerd is met het General Circulation Model (GCM) van het Engelse Hadley Centre (Mitchell et al, 1989 en 1990). GCM's simuleren de grootschalige luchtstromingen in de atmosfeer en het hiermee samenhangende klimaatsysteem. Deze kunnen een startpunt geven voor de veranderingen in seizoengemiddelde waarden van temperatuur en luchtdruk over zeer grote gebieden. Het IPCC stelt evenwel expliciet dat verwachtingen voor gebieden op de schaal van Europa nog niet uit modellen af te leiden zijn. Derhalve kan een GCM-voorspelling voor Europa op zijn best worden gezien als een scenario, dat als gevoelighedsindicator, maar niet als voorspelling geïnterpreteerd mag worden. De veranderingen in neerslag en neerslagintensiteiten zijn daarbij minder betrouwbaar dan de veranderingen in temperatuur.

Het UKHI-experiment is uitgevoerd voor het 'centrale schatting' IPCC emissie-scenario IS92a (zonder het effect van aërosolen), geprojecteerd op het jaar 2100. De stijging van de gemiddelde jaartemperatuur in het Rijngebied is volgens dit UKHI-scenario ongeveer 4°C. Scenario's overeenkomstig een gemiddelde temperatuurstijging van +1°C, +2°C in het Rijngebied zijn verkregen door lineaire interpolatie van de verandering tussen nu (verandering = 0) en de veranderingen volgens het UKHI-scenario in 2100. Volgens het UKHI-scenario is bij een gemiddelde temperatuurstijging van 2°C de gemiddelde jaarlijkse neerslagtoename in het Alpengebied ongeveer 2% en in Midden-Duitsland 5%. In de periode mei-juni geeft het UKHI-scenario een geringe afname van de neerslag aan, met name in het zuidelijke deel van het Rijngebied. In dit laatste opzicht verschillen de UKHI-scenario's dus van het KNMI-scenario, ofschoon de verwachte neerslagtoename in het KNMI-scenario gering is. Hierbij moet worden aangetekend dat in GCM's zomerse buien in het algemeen slecht gerepresenteerd worden. Voor het overige kan worden gecon-

stateerd dat de UKHI-neerslagscenario's voor het laagland en Midden-Duitsland niet veel verschillen van het KNMI-scenario bij de betreffende temperaturen. De veranderingen in temperatuur en neerslag in zomer en winter volgens de UKHI-scenario's zijn weergegeven in bijlage 2.

## 2.2 Zeespiegelstijging en stormvloeden

### Verleden

Langs de Nederlandse kust worden al sinds 100 jaar stijgende waterstanden gemeten. Deze stijging bestaat uit een stijging van de absolute waterstand en een natuurlijke bodemdaling; relatieve zeespiegelstijging genoemd. Deze bedraagt zo'n 20 cm per eeuw. Over de recente periode kan geen versnelling van deze stijging worden geconstateerd. Gaan we verder terug in de tijd dan geven de metingen van Amsterdam aan dat voorafgaande aan ongeveer 1850 er nagenoeg geen sprake van stijging was. De stijging vanaf 1850 kan gegeven het tijdstip niets te maken met een toeneming van het broeikaseffect. Het is vermoedelijk het gevolg van de overgang van de kleine ijstijd (een relatief koude periode in de 16<sup>e</sup> tot midden 19<sup>e</sup> eeuw) naar de huidige warmere periode.

Niet alleen de gemiddelde zeestand, maar ook het getij is aan verandering onderhevig. Het tijverschil (hoogteverschil tussen hoog- en laagwater) neemt op bijna alle plaatsen in Nederland toe. Het hoogwater stijgt sneller dan de zeespiegel, gemiddeld 5 cm per eeuw, en het laagwater stijgt gemiddeld zo'n 5 cm langzamer dan de zeespiegel. Voor een groot gedeelte is dit veroorzaakt door menselijke ingrepen, vooral door het uitdiepen van de vaargeulen is het tijverschil toegenomen. Dit speelt met name in de Eems-Dollard (het hoogwater stijgt gemiddeld 10 cm sneller dan de zeespiegelstijging) en in de Westerschelde (van 10 cm extra bij Vlissingen tot 30 cm extra bij de Belgische grens) (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 1995).

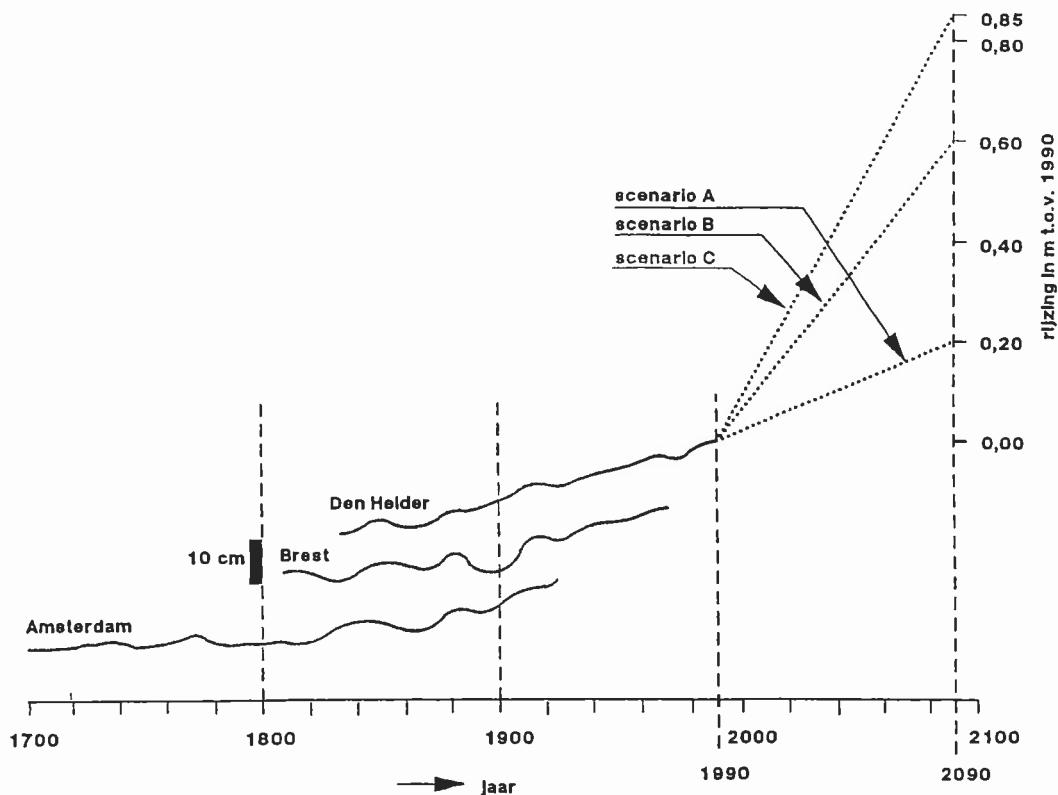
De laatste jaren zijn gekenmerkt door een relatief hoge depressie activiteit op de Atlantische Oceaan en daardoor relatief hoge stormactiviteit boven het Noordzeegebied (Carter en Draper, 1988). Nauwkeurige luchtdrukanalyses en betrouwbare metingen van golven en windsnelheden bestaan pas sinds zo'n 10 à 20 jaar. Onderzoek heeft aangetoond dat er in de laatste 100 jaar meer van zulke perioden zijn geweest. Van een toenemende trend lijkt geen sprake te zijn. (Können en Fransen, 1996; Bijl, 1996).

### Toekomst

Uitgaande van de (modiale) IPCC schattingen, waarin de klimaatverandering ten gevolge van het broeikaseffect worden beschouwd, wordt voor Nederland, waarbij de IPCC schattingen zijn gecorrigeerd, een relatieve zeespiegelstijging verwacht van zo'n 25 cm voor 2050 en 60 cm voor de komende 100 jaar (scenario B = centrale schatting). Als bovengrens (scenario C) wordt een stijging van respectievelijk 40 en 85 cm geschat. Scenario A geeft de voortzetting van het huidige tempo van zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw weer (zie fig.2).

Wat betreft de vergroting van de tijverschillen is aangenomen dat deze gelijk zullen zijn aan die in het verleden, omdat ook in de toekomst nieuwe menselijke ingrepen en morfologische aanpassingen zullen plaatsvinden. Door een verhoging van de zeespiegel zal het getij in de Noordzee enigszins veranderen. De hoogwaterstanden zullen daardoor naar verwachting hoogstens een paar centimeter extra hoger worden (De Ronde, 1996).

fig.2 Verloop gemiddelde zeestanden van Amsterdam, Brest en Den Helder (De Ronde en Vogel, 1988).



Een verandering in klimaat kan tot een verandering in het stormklimaat leiden. In lijn met de marges in zake stormfrequenties kan, wat betreft midden volgende eeuw, voor stormvloedfrequenties een marge van - plus of min - 5% rond de huidige frequenties worden aangehouden. Rond 2100 zal een ruimere marge moeten worden aangehouden.

## 2.3 Bodemdaling

### Natuurlijke processen

Nauwkeurigheids-waterpassingen, gebaseerd op ondergrondse merken die gefundeerd zijn in de bovenkant van de Pleistocene zanden laten zien dat deze peilmerken niet stabiel zijn. Deze instabiliteit is een gevolg van de bodembeweging van de Pleistocene en oudere aardlagen. Zowel natuurlijke processen als menselijke activiteiten veroorzaken deze bodembeweging.

Nederland heeft gedurende de geologische geschiedenis gelegen aan de rand van het Europese continent. Ook nu nog is er een natuurlijke kanteling aanwezig rond een noordoost-zuidwest as. Ruwweg komt dit neer op een daling van enkele centimeters per eeuw in noordwest Nederland en stijging van enkele centimeters per eeuw in zuidoost Nederland (Lorenz et al, 1991).

Naast genoemde bodembewegingen van de pre-Holocene lagen is er sprake van bodemdaling, die veroorzaakt wordt door natuurlijke processen in de Holocene afzettingen, met name ten gevolge van zetting en klink van klei en veen en oxydatie van veen. De hoogte van de grondwaterspiegel is voor deze processen van groot belang en wordt door menselijk handelen sterk beïnvloed.

## Mijnbouwkundige activiteiten

Naast bodembeweging ten gevolge van natuurlijke processen ontstaat er bodembeweging door menselijk ingrijpen. Antropogene oorzaken zijn ondermeer mijnbouwkundige activiteiten, zoals gas- en zoutwinning. De hieraan gerelateerde bodemdalingen kenmerken zich door een lokaal karakter en zijn in het algemeen goed kwantificeerbaar. Hierdoor zijn voorzorgs- en/of compenserende maatregelen vooraf te bepalen en is een heldere belangenafweging mogelijk.

### *Gaswinning*

Aardgas is onder hoge druk opgeslagen in overwegend zandsteenlagen op een diepte van 2000 tot 3500 meter. De winning van het aardgas heeft tot gevolg dat de vloeistofdruk in het gashoudende gesteente sterk kan afnemen, wat vervolgens leidt tot een toename van de gesteente druk. Deze druk heeft tot gevolg dat de zandsteen, waarin zich het aardgas bevindt, wordt samengedrukt. Dit kan aan het maaiveld tot ongeveer 35 cm daling geven. De uiteindelijke daling is afhankelijk van de omvang en de diepte van het aardgasveld. De omvang van de daling wordt door de mijnbouwmaatschappijen met regelmaat gemeten. Tevens worden prognoses van de uiteindelijk te verwachten daling opgesteld. De uiteindelijk te verwachten bodemdaling wordt mede bepaald door nieuwe gaswinning en is daarmee onzeker.

### *Zoutwinning*

In het noordoosten en oosten van het land wordt in de diepe ondergrond zout ( $\text{NaCl}$ ) gewonnen. In Groningen tot een diepte van ca. 1100 m, in Twenthe op een diepte van ca. 80 m. In Friesland wordt zout gewonnen op een diepte van ca. 2700 m. In Groningen, waar al enige decennia wordt gewonnen, zijn zinkingen tot 4 cm waargenomen. In Twente hebben enige oudere holten (50 jaar) tot ondergrondse instortingen geleid. Nieuwere cavernen worden met betere ontwerpnormen aangelegd. In Friesland wordt binnen 15 jaar een daling van maximaal 26 cm verwacht boven de cavernen waaruit momenteel wordt gewonnen. Na beëindiging van de winning zal de bodemdaling met sterk gereduceerde snelheid doorgaan.

In Veendam wordt ook Magnesiumzout gewonnen. Met een nieuwe winningsmethode laat men de reeds bestaande holten in dit relatief vloeibaarder zout doelbewust samengedrukt. Dit zal na beëindiging van de winning lokaal tot een bodemdaling van ca. 20 cm in het diepste punt leiden.

### *Steenkool*

Was er in het verleden in Limburg sprake van sterke bodemdaling (tot enkele meters) door de steenkoolwinning, thans vindt in deze gebieden bodemstijging plaats als gevolg van de geleidelijke stijging van het mijnwater. Deze kan lokaal oplopen tot 1 à 2 cm per jaar.

### *Bruinkool*

Vlak over de grens in Duitsland tussen Keulen, Aken en Roermond wordt in dagbouw naar bruinkool gedolven. Daarbij wordt op uitgebreide schaal de bruinkool tot honderden meters diep weggegraven. Om deze dagbouw mogelijk te maken wordt het gebied zeer intensief ontwaterd (1 miljard  $\text{m}^3/\text{jaar}$ ), ter plaatse is daardoor de grondwaterstand honderden meters verlaagd. Door diverse instanties is onderzoek gedaan naar de (lange termijn) effecten in Limburg en Brabant als gevolg van de bruinkoolwinning in Duitsland. Uit tijdsreeksanalyse van grondwaterstijghoogten blijkt dat op de grens met Duitsland in de 80er jaren de stijghoogten door de bruinkoolwinning trendmatig 25 cm per jaar daalden (Rolf, 1991). Daarnaast trad hier ook daling van de stijghoogten op van eenzelfde ordengrootte door toenemende drinkwaterwinning in Nederland. De dalingen van de stijghoogten planten zich voort in de

grondwaterstanden (Stuurman, 1996). Op grote diepte planten de verlagingen zich voort tot het midden van Noord-Brabant. Of er door drukafname in het grondwater ook merkbare bodemdalingen te verwachten zijn, is onduidelijk.

### **Grondwateronttrekkingen**

Grondwateronttrekkingen die een verlaging van de waterspanning in samendrukbare klei- of veenlagen veroorzaken kunnen zetting van die lagen veroorzaken, doordat de korrelspanning in deze lagen toeneemt. Vooral bij jonge holocene klei- en veenafzettingen kan dit tot substantiële bodemdaling leiden. Bij ondiepe onttrekkingen in en tussen deze lagen, bijvoorbeeld ten behoeve van oevergrondwateronttrekkingen en bronbemalingen, kan de dikte van deze pakketten lokaal sterk afnemen. Uit een studie naar de zettingsgevoeligheid van gronden in Friesland (Rijks Geologische Dienst, 1989) bleek dat bij een meter verlaging van de stijghoogte een zetting van 5 tot 10 cm van de holocene pakketten zou optreden. Uit een studie naar de effecten van de eventuele aanleg van de Markerwaard (Claessen et al, 1989) blijkt de bodemdaling 5 à 10% van de grondwaterstijghoogte verlaging in het eerste watervoerende pakket te bedragen. Overigens is het vaak moeilijk om vast te stellen welk deel van een waargenomen zetting is toe te schrijven aan de onttrekking van grondwater, omdat ook andere factoren een rol spelen.

### **Oxydatie en klink**

Om klei- en veengebieden in laag Nederland geschikt te houden voor bebouwing of landbouwkundig gebruik is een zekere mate van drooglegging (ontwatering) noodzakelijk. De ontwatering brengt processen op gang die in de bovenste meters van de bodem voor bodemdaling zorgen. Deze processen worden doorgaans aangeduid met de termen oxydatie, rijping, klink en zetting. Er is enige overlap tussen deze termen, mede doordat ze voortkomen uit verschillende disciplines. In dit rapport wordt onderscheid gemaakt tussen oxydatie, een proces waarbij organisch bodemmateriaal (veen) mineraliseert, en de overige processen, die alle iets te maken hebben met volumevermindering van het bodemmateriaal door verkleining van de fractie water. Volumevermindering kan optreden in de door ontwatering dikker wordende onverzadigde zone, maar ook tot op enige diepte onder het freatisch vlak, door afname van de grondwaterstijghoogte. In dit laatste geval kan sprake zijn van een regionaal effect, omdat verandering in de grondwaterstijghoogte doorwerkt in de nabije omgeving.

Genoemde processen zijn geheel of gedeeltelijk irreversibel, en krijgen bij elke volgende peilverlaging een nieuwe impuls.

Om de vereiste drooglegging te kunnen blijven realiseren moet het polderpeil naar beneden toe worden aangepast, wat tot verdere bodemdaling leidt. Hier is sprake van een neergaande spiraal. Grote delen van Nederland zijn sinds in cultuurname al enkele meters gezakt. Na 1945 is ten behoeve van de intensivering van de landbouw, veel verbetering in de ontwateringstoestand aangebracht. Een belangrijk deel van deze verbeteringen is gerealiseerd in het kader van ruilverkavelings- en landinrichtingsprojecten. Hierdoor is de daling van het maaiveld met name in de veengebieden in de afgelopen decennia versneld. Bij de huidige praktijk liggen de dalingsnelheden in veengebieden gemiddeld op circa 100 cm/eeuw, maar het dubbele kan plaatselijk voorkomen (Schokking, 1993; Janssen en Halbersma, 1996). Verschillen in drooglegging, grondgebruik en bodemprofiel zijn de belangrijkste veroorzakers van ruimtelijke variatie in dalingsnelheid. In Holland, met vele meters dikke veenlagen, zal deze bodemdaling langer doorgaan dan in Friesland met veenlagen van

gemiddeld 1 à 2 meter.

#### **Landelijk beeld van de bodemdalingen**

Kaart 2 geeft een landelijk overzicht van de verwachte dalingen van het maaiveld in 2050 t.o.v. de huidige situatie. In de kaart is rekening gehouden met drie oorzaken van bodembeweging, nl.:

- dalingen als gevolg van klink en oxydatie van holocene afzettingen;
- dalingen als gevolg van aardgaswinning in Groningen en Friesland;
- dalingen en stijgingen als gevolg van tektonische bewegingen (de kantelen-de beweging waarbij het noordwesten van Nederland daalt en het zuidoosten van Nederland stijgt).

De dalingen als gevolg van klink en oxydatie zijn bepaald door per legenda-eenheid van de bodemkaart een daling aan te nemen, gebaseerd op cijfers uit de literatuur (Schokking, 1993). In bijlage 3 is per bodemfysische eenheid, afgeleid van de bodemkaart van Nederland (Wösten et al, 1988), de verwachte daling in 2050 als gevolg van klink en oxydatie weergegeven.

In natuurgebieden is aangenomen dat de daling niet meer dan 10 cm bedraagt. Doordat in de natuurgebieden de polderpeilen in het algemeen zo hoog mogelijk worden gehandhaafd, zal de daling als gevolg van klink en oxydatie hier aanzienlijk minder zijn.

In Zuidelijk Flevoland treedt een versterkte daling op als gevolg van het rijpingsproces: in dit gebied zijn nog dalingen te verwachten tussen de 10 en de 70 cm voor 2050. De gegevens voor dit gebied zijn afkomstig uit een recente prognose van de maaiveldsdaling voor Zuidelijk Flevoland (Van Dooremolen et al, 1996).

De gegevens voor de schatting van de dalingen voor 2050 als gevolg van de gaswinning in Groningen en Friesland zijn afkomstig van de NAM. De maximale daling bedraagt 36 cm in het gebied rond Loppersum (tussen Groningen en Delfzijl). Ook in de buurt van het Lauwersmeer treden flinke dalingen op: twee gebieden hebben een daling van ongeveer 25 cm.

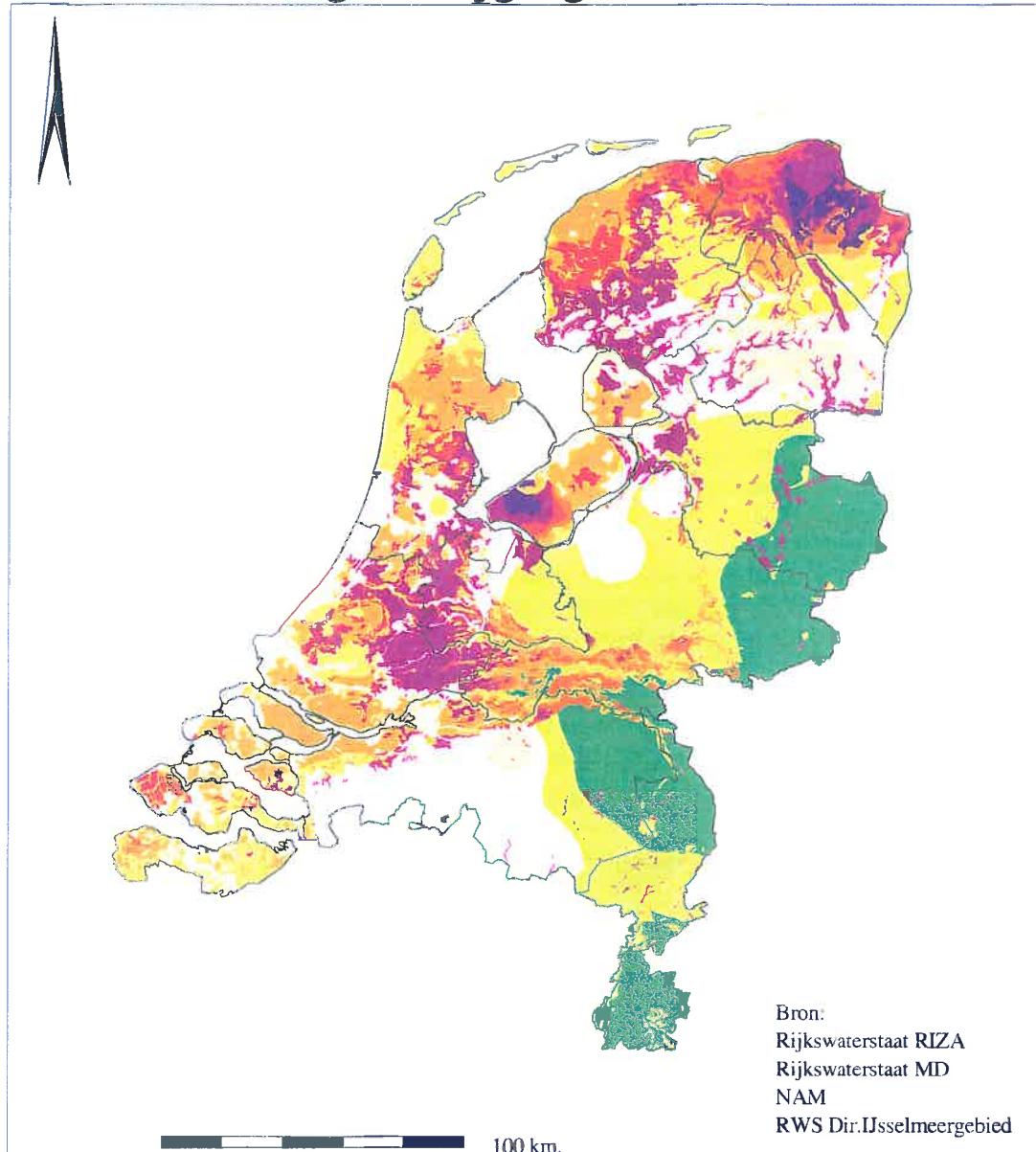
De gegevens over de tektonische beweging zijn afkomstig van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (Lorenz et al, 1991). Het noordwesten daalt met maximaal 7 à 8 cm per eeuw en het zuidoosten stijgt met maximaal 7 à 8 cm per eeuw.

#### **Regionaal beeld: bodemdaling in de Krimpenerwaard**

Het landelijk beeld, zoals gepresenteerd in kaart 2, suggereert een tamelijk gelijkmataige bodemdaling per regio. Lokale verschillen in grondsoort, bodemgebruik en grondwaterstand geven een ander beeld te zien. Als voorbeeld is in kaart 3 de bodemdaling tussen 1984 en 1994 in de Krimpenerwaard weergegeven (Veltman, 1996).

De Krimpenerwaard is een onderdeel van het veenweidegebied in de provincie Zuid-Holland. Tot het jaar 1000 na Chr. maakte het gebied deel uit van een uitgestrekt hoogveenengebied. Dit hoogveenpakket (10 à 14m dik) was gevormd tijdens het Holoceen. In de laat-middeleeuwse periode (1000-1300 na Chr.) is een begin gemaakt met het in cultuur brengen van de Krimpenerwaard. Kenmerkend voor het gebied was dat het vervoer tot 1960 hoofdzakelijk over het water plaatsvond. Voor ontsluiting over land was het noodzakelijk de drooglegging te vergroten (extra draagkracht).

## Kaart 2: Daling of stijging van het maaiveld



Verwachte bodemdaling voor 2050

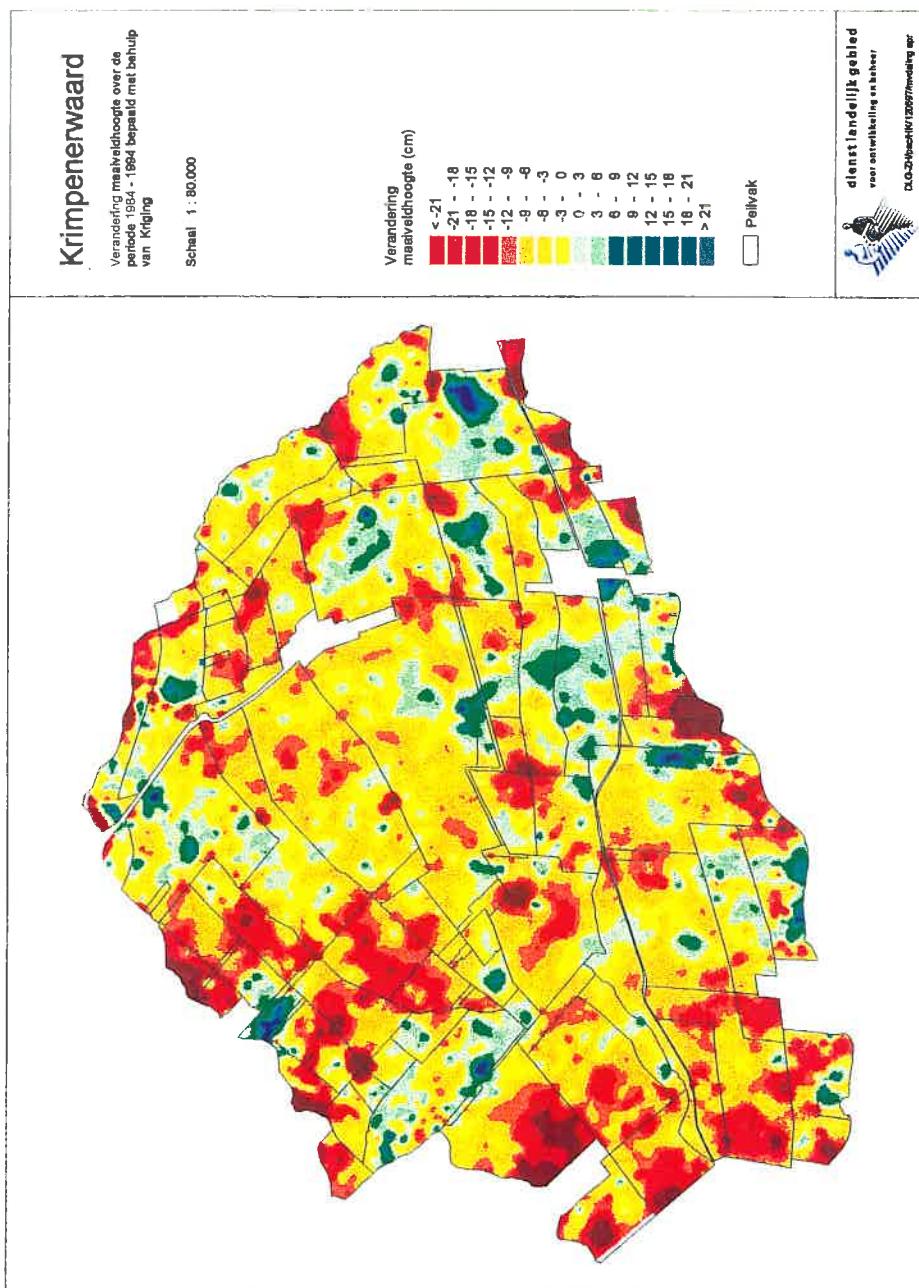
daling meer dan 60 cm	daling tot 2 cm
daling 40 - 60 cm	geen verandering
daling 30 - 40 cm	stijging tot 2 cm
daling 20 - 30 cm	stijging meer dan 2 cm
daling 10 - 20 cm	
daling 2 - 10 cm	

Als gevolg van ontwatering heeft een grote daling van de bodem plaatsgevonden. Vanaf ca. 1850 zijn nauwkeurige gegevens bekend over polderpeilen; maaiveldhoogten kunnen daarvan worden afgeleid. Op grond van deze gegevens kan de opgetreden bodemdalingen worden berekend. Daarbij is onderscheid gemaakt in de periode voor en na 1960.

De bodemdaling bedroeg tot 1960 zo'n 15 tot 60 cm per eeuw. Na 1960 is de dalingssnelheid toegenomen (20 tot 150 cm/eeuw).

Als gevolg van de verschillen in dalingssnelheden tussen gebieden onderling, zijn de hoogteverschillen binnen het gebied toegenomen sinds 1850 met 50 tot 100 cm. (Janssen en Halbersma, 1996).

Kaart 3: Verandering in maaiveldhoogte in de Krimpenerwaard





### 3. RIVIEREN EN IJSSELMEER

#### 3.1 Rivieren

Tot het systeem 'grote rivieren' worden gerekend de rivierarmen van de Rijn en de Maas, omvattende de Nederrijn-Lek (tot Hagestein), de IJssel, de Waal (tot Vuren), en de Maas (tot Lith). Op deze 'bovenrivieren' is geen of slechts zeer geringe getijdewerking aanwezig en de waterbeweging wordt volledig door de rivieraafvoer bepaald. Tevens worden relatief kleine rivieren zoals de Overijsselsche Vecht tot het systeem 'rivieren' gerekend.

##### 3.1.1 Huidige situatie

###### Rijn

De Rijn is een gecombineerde regen/smeltwater rivier en voert water af uit een gebied met een oppervlakte van 185.000 km<sup>2</sup>. In het winterhalfjaar bestaat de afvoer voornamelijk uit regenwater. In de Alpen valt een groot deel van de neerslag in de winter als sneeuw, die daar enkele maanden kan blijven liggen. Aan het eind van het voorjaar smelt de sneeuw; in de zomermaanden vormt het smeltwater de belangrijkste component van de Rijnafvoer. Als gevolg van de hoge verdamping door de vegetatie is de bijdrage van neerslag uit de rest van het stroomgebied in de zomer relatief gering. Het gecombineerde regen/smeltwater regime bezorgt de Rijn een regelmatig afvoerpatroon, waardoor de rivier het gehele jaar bevaarbaar is. De gemiddelde afvoer van de Rijn bij Lobith bedraagt ongeveer 2200 m<sup>3</sup>/s; de mediane afvoer is ongeveer 2300 m<sup>3</sup>/s. De hoogste Rijnafvoer gemeten bij Lobith bedraagt 12.600 m<sup>3</sup>/s (1926). De laagst gemeten afvoer is 620 m<sup>3</sup>/s (1947).

Wanneer de afvoer van de Rijn 2300 m<sup>3</sup>/s of hoger is, wordt ongeveer 2/3 van het water via de Waal afgevoerd. De IJssel voert ongeveer 1/9 af, en het overige deel gaat via de Nederrijn-Lek. Bij lagere afvoer treedt het stuwingaprogramma van de Nederrijn in werking. Tot een afvoer van 1400 m<sup>3</sup>/s bij Lobith wordt hiermee 285 m<sup>3</sup>/s door de IJssel gestuurd. Als de Rijnafvoer verder daalt worden de stuwen afgesteld op een minimum van 25 m<sup>3</sup>/s door de Nederrijn.

###### Maas

Het stroomgebied van Maas heeft een oppervlakte van ongeveer 33.000 km<sup>2</sup>. De Maas is een typische regenrivier, met een afvoermaximum in de winter, en zeer lage afvoer in de zomermaanden. Omdat de bodems in de Ardennen slecht doorlatend zijn reageert de afvoer van de Maas snel op neerslagpieken. Het afvoerverloop van de Maas is dan ook grilliger dan dat van de Rijn. Gemiddeld is de afvoer van de Maas bij Borgharen ongeveer 230 m<sup>3</sup>/s, terwijl de mediane afvoer 170 m<sup>3</sup>/s bedraagt. De hoogst gemeten afvoer is 3120 m<sup>3</sup>/s, tijdens het hoogwater van Kerst 1993. De laagst gemeten afvoer voor de Maas bij Borgharen is 0 m<sup>3</sup>/s. Om ook bij lage afvoer scheepvaart over de Maas mogelijk te maken is deze over vrijwel het gehele deel tot Lith gestuwd.

###### Kleine rivieren binnen Nederland

De Overijsselse Vecht is de grootste van de kleine rivieren in Nederland, met een gemiddelde afvoer van bijna 40 m<sup>3</sup>/s. De Vecht heeft een door regen gestuurd afvoerregime, met een hoge winterafvoer, een lage zomerafvoer, en sterke afvoerfluctuaties. In vergelijking met de Rijn is de afvoer van de

Vecht in de orde van een factor 50 kleiner; hetzelfde geldt voor de oppervlakte van het stroomgebied.

### 3.1.2 Veranderingen

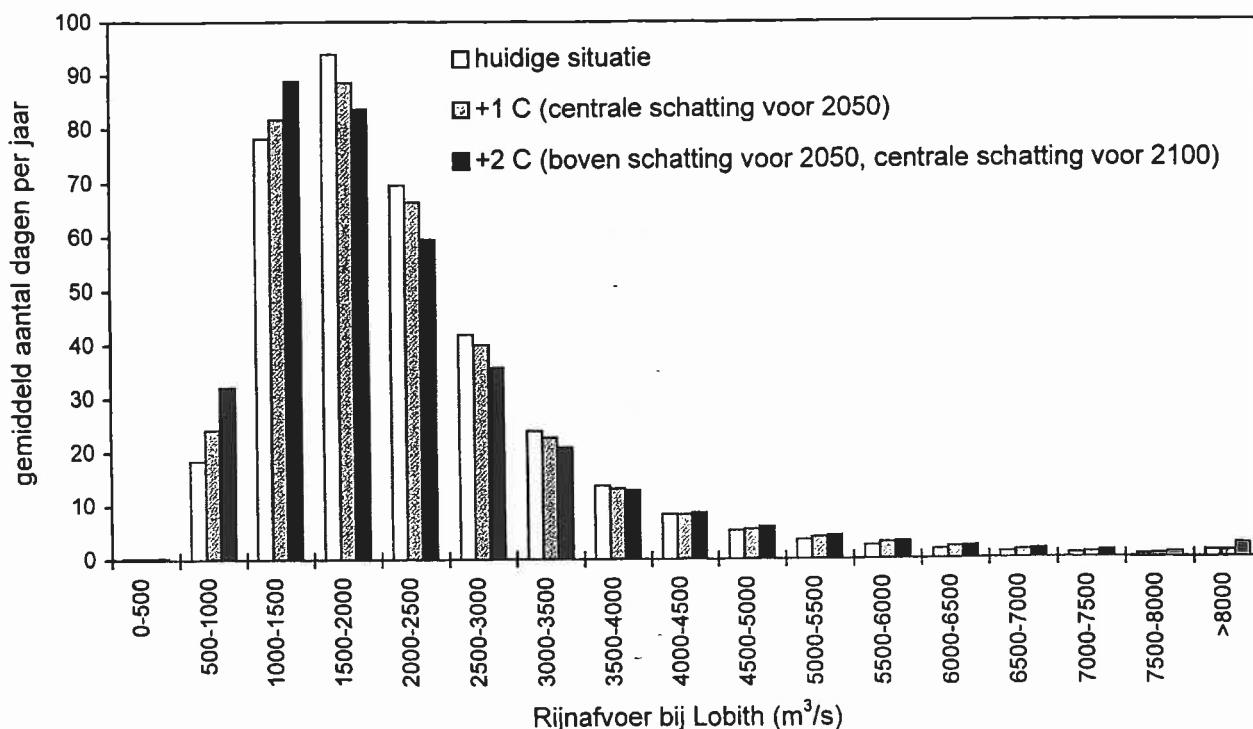
Klimaatveranderingen veroorzaken een verandering in de verdeling van de afvoer van de grote rivieren over het jaar: de winterafvoer neemt toe en de zomerafvoer neemt af. Daarbij kunnen toekomstige extreme afvoeren buiten het huidige (maatgevende) bereik aan afvoeren reiken. Dit geldt zowel voor hoge als zeer lage afvoeren. Naar huidige inzichten neemt de totale jaarlijkse afvoer slechts weinig toe.

#### Rijn

Klimaatveranderingen zullen het afvoerregime van de Rijn veranderen van een gecombineerd regen/smeltwater regime naar een meer door regen bepaald regime (Kwadijk, 1993). De winterafvoer neemt gemiddeld toe. In de eerste plaats komt dit door een toename van de neerslag in de winter. Daarnaast verandert de afvoer vanuit het Alpengebied: als gevolg van de temperatuurstijging wordt in de Alpen minder neerslag in de vorm van sneeuw opgeslagen, en de sneeuw die opgeslagen wordt, begint eerder in het seizoen te smelten. In de zomer is de hoeveelheid smeltwater daardoor kleiner. In het zomerhalfjaar is naar verwachting de neerslag met name in het zuidelijke deel van het Rijngebied lager, en neemt de verdamping als gevolg van de hogere temperatuur toe. Dit resulteert in een verdere afname van de zomerafvoer van de Rijn, in de orde van 5% volgens de centrale schatting in 2050. De veranderingen in gemiddelde maandafvoer als gevolg van klimaatverandering zijn in figuur 3 weergegeven.

fig.3 Frequentiehistogram van de Rijnafvoer bij Lobith voor verschillende klimaatscenario's.

Frequentiehistogram van de Rijnafvoer bij Lobith voor verschillende klimaatscenario's



De toename van gemiddelde maandafvoeren in het winterseizoen zal gepaard gaan met hogere piekafvoeren. Uitgaande van de centrale schatting van 1°C temperatuurstijging in 2050 is het naar de huidige inzichten mogelijk dat de maatgevende afvoer tegen die tijd in de orde van 5% toegenomen is. In de zomerhalfjaar zullen perioden met zeer lage afvoer naar verwachting frequenter voorkomen en gemiddeld langer duren. Voor de periode na 2050 is een verdere toename van de extremen te verwachten.

### **Maas**

Veranderingen in hoge afvoeren van de Maas zullen ruwweg evenredig veranderen met gebiedsneerslagen in het stroomgebied. Dit komt doordat in een situatie van hoge afvoer het stroomgebied van de Maas heel direct op de neerslag reageert. Uitgaande van de neerslagveranderingen volgens de KNMI-scenario (bijlage 1) is te verwachten dat bij de centrale schatting van 1°C temperatuurstijging in 2050 de neerslag tijdens extreme situaties met 10% kan toenemen. Dit heeft tot gevolg dat de afvoerpieken van de Maas halverwege de komende eeuw in de orde van 8% zullen zijn toegenomen. In de toekomst zullen naar verwachting de afvoerpieken verder stijgen. Herhalingsstijden van afvoerpieken zoals die van 1993 en 1995 (herhalingsstijden nu 120 en 60 jaar) kunnen, uitgaande van de centrale schatting van het KNMI voor het jaar 2050 afgenoemt zijn tot ruwweg 80 respectievelijk 40 jaar (Parmet en Burgdorffer, 1996). De effecten op de zomermafvoeren zijn nog niet kwantitatief in te schatten, omdat het netto effect van een verwachte toename van de zomerneerslag en een hogere verdamping op de Maasafvoer niet goed bekend is. Hoewel het KNMI-scenario een toename van extreme neerslag in het zomerseizoen aangeeft, hoeft dit niet tot een toename van piekafvoeren van de Maas in de zomer te leiden. Dit wordt veroorzaakt door de geringe ruimtelijke correlatie van de buien.

### **Kleine rivieren in Nederland: Overijsselse Vecht**

Ook voor de kleinere rivieren in Nederland, zoals de Vecht, zijn vooral veranderingen in neerslag bepalend voor de afvoer. Afvoer veranderingen voor de Overijsselsche Vecht die bij het KNMI-scenario van 1°C temperatuurstijging voor 2050 te verwachten zijn kunnen als volgt worden samengevat (Parmet et al., 1995). De gemiddelde jaaraafvoer neemt in de orde van bijna 10% toe. In de winter neemt de afvoer het sterkst toe, als gevolg van de hogere neerslag. Piekafvoeren, die voornamelijk in de winter voorkomen, worden hoger, tot ruim 10% voor de maatgevende afvoer. In de zomermaanden stijgt de verdamping als gevolg van de hogere temperaturen, maar deze is naar verwachting geringer dan de neerslagtoename. Veranderingen in verdamping hangen ook af van veranderingen in plantenfisiologie en landgebruik. Bij een toegenomen CO<sub>2</sub> concentratie worden de huidmondjes van planten kleiner en verdampen zij minder water. Een mogelijke toekomstige afname van het areaal landbouwgrond ten gunste van het oppervlak bos kan daarentegen in een toename van de verdamping resulteren. Afhankelijk van de verwachtingen omtrent fysiologische aanpassingen van de vegetatie, en veranderingen in landgebruik wordt aangenomen dat de zomermafvoer van de Vecht in de orde van enkele procenten kan toenemen.

### 3.1.3 Gevolgen voor de functies

De primaire functie van de grote rivieren is het veilig afvoeren van water, sediment en ijs. Daarnaast vervullen de rivieren en de uiterwaarden belangrijke functies voor de natuur, economie en de waterhuishouding van de regionale watersystemen binnen Nederland. Veranderingen in afvoer als gevolg van klimaatverandering zullen dus gevolgen kunnen hebben voor de rivierfuncties.

#### **Veiligheid**

##### *Huidige situatie*

In de Wet op de waterkering is de voor primaire waterkeringen geldende veiligheidsnorm vastgelegd. Deze norm is aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste waterstand: de maatgevende hoogwaterstand (MHW), waarop de waterkering moet zijn berekend. De norm voor de rivierdijken varieert van 1/1250 voor het bovenrivierengebied tot 1/10.000 voor Zuid-Holland. De huidige maatgevende afvoer waarop de MHW in het bovenrivierengebied is gebaseerd, bedraagt voor de Rijn 15.000 m<sup>3</sup>/s en voor de Maas 3650 m<sup>3</sup>/s. In het kader van het Deltaplan Grote Rivieren zullen in 2000 alle dijkringgebieden langs de rivieren aan de veiligheidsnorm voldoen. Na 2000 worden de primaire waterkeringen elke 5 jaar opnieuw aan de veiligheidsnorm getoetst. Voor het onbedijkte deel van de Maas, waarvoor de veiligheidsnorm niet geldt, zijn afzonderlijke maatregelen gepland, voornamelijk gericht op vergroting van de afvoercapaciteit. Op dit moment worden MER studies (milieu-effect rapportages) uitgevoerd.

##### *Veranderingen*

Naar huidige inzichten worden de piekafvoeren van de grote rivieren de komende eeuw hoger. De geschatte kansen op extreem hoge pieken zijn omgeven door een te brede band van onzekerheid. Op grond van de huidige kennis wordt aangenomen dat rond 2050 de maatgevende afvoer van de Rijn in de orde van 5% hoger kan zijn dan nu, en die van de Maas in de orde van 10%. Een verdere stijging na 2050 wordt verwacht.

Daarnaast is van belang dat een toename van de extreme afvoeren de dynamiek van rivierprocessen vergroot met bijvoorbeeld een toename van de sedimentatie van slijm. Bij de centrale schatting voor 2050 (bijlage 1) kan de slijmsedimentatie op de uiterwaarden, afhankelijk van de aanwezigheid van een zomerkade, in de orde van 20 tot 40% toenemen (Middelkoop, 1997). Ook de afzetting van zand op de oevers zal sterker worden, kwantitatieve schattingen zijn echter nog niet te geven. Dit heeft effecten voor de waterbeweging en dus voor waterstanden.

#### **Binnenscheepvaart**

##### *Huidig beleid*

De rivieren zijn belangrijke transportwegen voor binnenscheepvaart. Voor de nabije toekomst wordt een groei van het goederentransport verwacht die voor het jaar 2015 in de orde van tientallen procenten kan bedragen. Tegelijkertijd vindt er een verschuiving plaats naar het gebruik van grote scheepstypen.

Voor het optimaal functioneren van de binnenscheepvaart zijn een minimale breedte en diepte van de vaargeul vereist. Bij zeer lage rivieraafvoer is de waterdiepte gering, en kunnen schepen minder diep geladen worden. In de huidige situatie ontstaan extra kosten voor de binnenscheepvaart als de afvoer van de Rijn lager is dan 1600 m<sup>3</sup>/s. Bij afvoeren beneden 1300 m<sup>3</sup>/s nemen de transportkosten snel toe. Anderzijds kan tijdens perioden van extreem

hoge afvoeren om veiligheidsredenen een vaarverbod van kracht zijn. In de huidige situatie wordt als norm voor de vaargeul in de Waal een breedte van 150 m bij een diepte van 2.5 m gehanteerd bij Overeenkomst Lage Rivierafvoer (OLR) van de Rijn (ongeveer 980 m<sup>3</sup>/s bij Lobith). Voor 2010 wordt gestreefd naar een breedte van 170 m bij een vaargeuldiepte van 2.8 m. Om aan de doelstellingen voor de binnenscheepvaart te voldoen worden zowel in de Waal (in het kader van Hoofd Transport As Waal) als in de Maas (Modernisering Maas Route) verbeteringen in de vaargeul aangebracht.

#### **Veranderingen**

Als gevolg van het langduriger optreden van lage afvoeren, zullen met name grotere binnenschepen op de Waal vaker slechts gedeeltelijk geladen, of niet kunnen varen. Vooralsnog lijken de gevolgen voor de zes-baks duwvaart beperkt, omdat in de afvoeren waarbij deze combinaties kunnen (2500-5500 m<sup>3</sup>/s) varen weinig verandert. De gemiddelde stremmingsduur van schepen met een aflaaddiepte op het traject Rotterdam-Basel zal in 2050 in de orde van 20 tot 25% toegenomen kunnen zijn (Nomden, 1997). De vaarwegverbeteringen aan de Waal en aan het Duitse deel van de Rijn zullen de verwachte scheepvaartbelemmeringen voor een deel compenseren. De scheepvaart in de Maas is minder gevoelig voor lage afvoeren, omdat deze rivier grotendeels gestuwd is.

In het kader van het project Watersysteem Verkenningen is een schatting gemaakt van de meerkosten van het transport die op kunnen treden bij een toename van periodes met lage afvoer. Voor de binnenscheepvaart als geheel kunnen de meerkosten van transport tot in de honderden miljoenen gulden per jaar gaan bedragen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996).

Een positief effect van klimaatverandering is dat bij een toename van de temperatuur belemmering van scheepvaart door ijsgang op den duur gemiddeld zal afnemen.

#### **Natuur**

##### **Streefbeeld**

De grote rivieren maken deel uit van de Ecologische Hoofdstructuur. Het streefbeeld voor de rivierenatuur bestaat uit een landschap dat gevormd wordt door natuurlijke processen in de uiterwaarden, zoals regelmatige overstroming, erosie en sedimentatie (Postma et al, 1995). Hierdoor ontstaat een dynamisch landschap zoals beschreven in 'Levende Rivieren' (Wereld Natuur Fonds, 1992), met natuurlijke vegetatie, natuurlijke oevers, en nevengeulen met ondiep stromend water.

#### **Veranderingen**

Veranderingen in frequenties van overstromingen en in stroomsnelheidspatronen binnen uiterwaarden beïnvloeden de waterhuishouding en morfologische processen van het winterbed. In het algemeen zullen inundatiefrequenties in het winterhalfjaar toenemen; in de zomer zullen langere perioden van droogte optreden. Een hogere overstromingsfrequentie zal leiden tot een toename van de sedimentatie van slib; zie hierboven ('veiligheid'). De grotere dynamiek van de rivierprocessen sluit in principe aan bij het natuurstreefbeeld en is als positief effect aan te duiden. Een toename van situaties met zeer laag water is ongunstig voor de natuur volgens het streefbeeld. Dit komt omdat in het streefbeeld een veel groter areaal is voorzien voor ecotopen die gebonden zijn aan natte omstandigheden, en waarvoor droogte in de zomer ongunstig is. In kleine stagnante wateren zal een temperatuurstijging leiden tot een hogere primaire productie. Tevens zal de biologische afbraak van organisch materiaal toenemen. Een sterke algenbloei kan echter tot zuurstoftekort in het water leiden. Ook op indirecte wijze heeft klimaatverandering invloed op

de (toekomstige) vegetatie van de uiterwaarden. De vegetatie in de uiterwaarden beïnvloedt de bergings- en afvoercapaciteit van de rivier. Een stijging van de maatgevende afvoer zal een grotere bergings- en afvoercapaciteit van het winterbed vereisen, wat effect kan hebben op de beschikbare ruimte voor vegetatie.

### **Watervoorziening regionale gebieden, drinkwater en industrie**

#### *Huidige situatie*

Voor de watervoorziening zijn lage rivieraafvoeren in het algemeen de beperkende factor. Bij lage afvoer wordt de waterverdeling van de grote rivieren binnen Nederland gestuurd. De stuwen in de Nederrijn zorgen voor een voldoende watertoevoer naar het IJsselmeer. Met de Haringvlietsluizen wordt de afvoer door de Nieuwe Waterweg gestuurd om de indringing van de zouttong tegen te gaan. Voor het inlaten van water in West-Nederland is een voldoende hoge afvoer van de Rijn vereist. Zo is voor de inname vanuit de Hollandsche IJssel bij Lobith een minimale afvoer van 1200 m<sup>3</sup>/s nodig. Bij lagere rivieraafvoer wordt het zoutgehalte bij de inlaatpunten te hoog.

In de derde Nota waterhuishouding (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1989) zijn de prioriteiten gesteld voor de (oppervlakte)waterverdeling bij watertekorten in regionale wateren. Waterbehoeften voor peilhandhaving in verband met bodemdaling en stabiliteit van constructies heeft de hoogste prioriteit. Onttrekkingen ten behoeve van hoogwaardig gebruik in de drinkwatervoorziening, de glastuinbouw en de industrie worden zoveel mogelijk ontzien. Een lagere prioriteit hebben doorspoeling, de koelwatervoorziening, de landbouw en de scheepvaart.

#### *Veranderingen*

Doordat lage rivieraafvoeren frequenter voorkomen, zullen de chloride concentraties in het water vaker te hoog zijn voor de inname van water vanuit de rivieren. Voor de Hollandsche IJssel zou dit in de loop van de komende decennia gemiddeld enkele weken per jaar het geval kunnen zijn.

De afgelopen jaren is gebleken dat vooral de verontreinigingen in het oppervlaktewater de beperkende factor geweest is voor de inname van drinkwater. Voor de drinkwatervoorziening vanuit de grote rivieren is de hoeveelheid water vooralsnog toereikend.

### **Koelwatervoorziening industrie**

#### *Huidige situatie*

Zowel rivierwater als water uit regionale oppervlaktewateren wordt gebruikt als koelwater voor industrie en elektriciteitscentrales. Beperkingen voor lozen van koelwater hangen samen met de mate waarin dit het oppervlaktewater opwarmt. Een te hoge opwarming van het oppervlaktewater heeft negatieve effecten op de aquatische ecosystemen. De daarmee samenhorende lage zuurstofgehalten, algengroei en botulisme kunnen leiden tot vissterfte, en zijn negatief voor de volksgezondheid en recreatie.

De maximale koelwatercapaciteit van een waterloop hangt af van zowel watertemperatuur als het debiet. Hierbij gelden ten aanzien van de oppervlaktewater temperaturen de volgende normen: het geloosde koelwater mag niet warmer dan 30°C zijn. Bovendien mag het temperatuurverschil tussen het ingenomen en geloosde koelwater in de zomer niet meer dan 7°C, en in de winter niet meer dan 15°C bedragen. De maximale warmtelast die een centrale op het oppervlaktewater mag losen is afhankelijk van het soort water (rivier, kanaal etc.). Bij rivieren mag de temperatuurstijging als gevolg van de lozing van koelwater niet meer dan 3°C bedragen (Pulles, 1985). In warme en droge perioden

met lage rivieraafvoer, zoals de zomers van 1994 en 1995, kan een situatie ontstaan waarin de elektriciteitsproductie niet meer ongestoord kan plaatsvinden zonder dat de koelwaternormen overschreden worden.

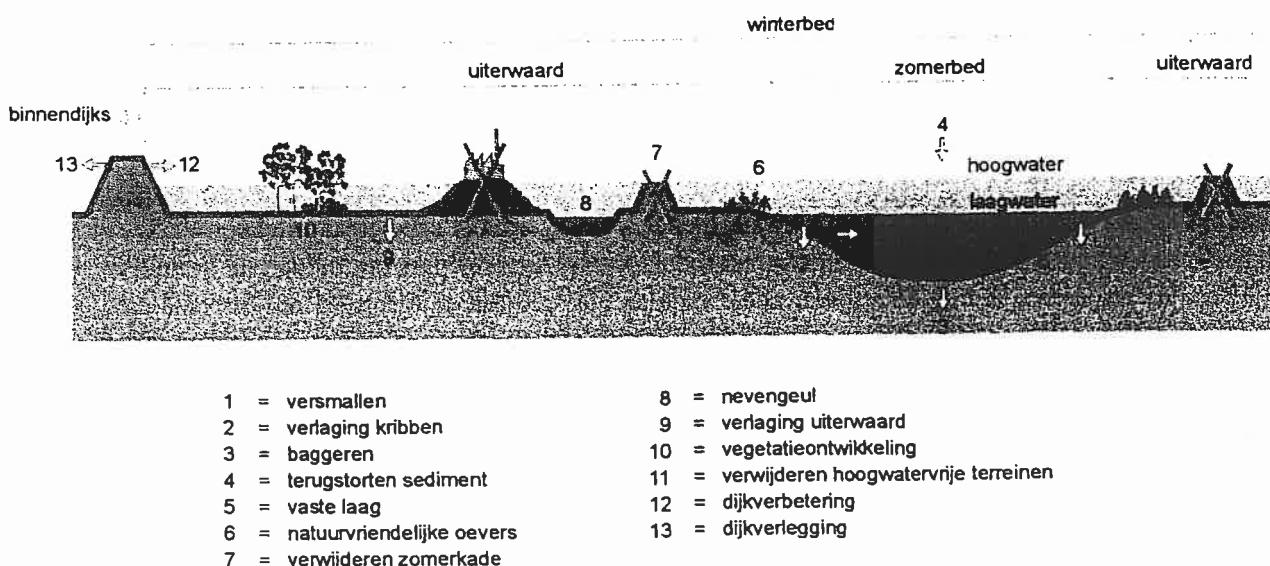
#### *Veranderingen*

Uitgaande van de in het ISOS (Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1991) gemaakte schatting van de financiële gevolgen van een lagere zomerafvoer van de Rijn voor de elektriciteitscentrales kunnen de extra kosten van koeling met behulp van koeltorens bij de centrale schatting oplopen tot in de orde van f 6 miljoen per jaar in 2050.

#### 3.1.4 Maatregelen

De verschillende functies van de rivieren stellen soms tegengestelde eisen aan de inrichting van het riviersysteem. Dit houdt in dat er keuzes gemaakt moeten worden. De drie belangrijkste functies van de rivieren zijn de veilige afvoer van water, natuur en scheepvaart. Het veilig afvoeren van water, duurzame bescherming tegen hoogwater, staat voorop. In de NW4-rapport 'Bescherming tegen hoogwater' (Berger et al, 1997) worden de lijnen geschetst voor duurzame bescherming tegen hoogwater en voor de inrichting van het rivierengebied. Ook zonder klimaatveranderingen moeten er maatregelen getroffen worden in het rivierengebied om zoveel mogelijk aan de eisen van veiligheid, natuur en scheepvaart te kunnen voldoen. Voor Nederland, gelegen in de delta van de grote rivieren is "ruimte voor de rivier" het basisprincipe. Een veelvoud van maatregelen is denkbaar in het Nederlands rivierengebied. In de studie Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR) is een verkenning uitgevoerd naar mogelijkheden en effecten van maatregelen als in figuur 4 weergegeven (Silva en Kok, 1996). Naast deze maatregelen in het rivierbed zelf, zijn er ook maatregelen, gericht op retentie, in het binnendijks gebied denkbaar.

fig.4 Overzicht van rivierkundige maatregelen in het winterbed van de grote rivieren (Silva en Kok, 1996).



### **Veiligheid en inrichting**

Klimaatveranderingen vormen bij de inrichting van het rivierengebied een belangrijke onzekerheid voor de toekomst. Naar verwachting is er in de toekomst meer ruimte voor de rivier nodig door een toename van de maatgevende afvoeren. In dit opzicht is het gewenst nu al ruimte voor de toekomst te reserveren, die gebruikt kunnen worden als klimaatverandering deze extra ruimte vereist. Veelal langdurige procedures die voorafgaan aan maatregelen (onteigeningssprocedures, wetswijzigingen) dienen daarom nu voorbereid of gestart te worden.

Onzekerheid in klimaatverandering maakt het noodzakelijk dat maatregelen die nu (voor)genomen worden flexibel moeten zijn richting de toekomst. Ze moeten passen in of relatief eenvoudig aan te passen zijn aan een situatie die meer ruimte voor de rivier vereist. Reserveringen van extra ruimte voor de rivier, binnen maar ook buiten het huidige rivierbed, kan veelal goed samengaan met natuurontwikkeling. Gebieden kunnen nu aangekocht worden, en voorlopig als natuurgebied worden ingericht. Mocht over enkele decennia blijken dat een verruiming van het winterbed nodig is, dan kunnen deze gebieden hiervoor relatief eenvoudig ingezet worden.

In geval van ingrepen of constructies die en zeer lange levensduur hebben is het wenselijk nu al een extra marge voor veranderd klimaat in te bouwen, omdat aanpassingen later veel kostbaarder zijn.

### **Binnenscheepvaart**

Op dit moment leven mogelijke problemen die op kunnen treden bij een veranderd klimaat niet erg bij de binnenscheepvaart zelf (Van Geenhuizen et al, 1996). Hinder door lage afvoeren wordt in het algemeen gezien als één van de aan scheepvaart inherente risico's, en het huidige logistieke systeem lijkt vooralsnog voldoende flexibel om (toekomstige) problemen op te lossen. Een frequenter optredende ongunstige afvoersituatie op de Rijn, gecombineerd met hoger wordende eisen aan het verladers-systeem en de verwachte toename van de vervoersstroom van binnenvaart, is mogelijk de huidige rek in het logistieke systeem op termijn ontoereikend. De huidige trend in de richting van grote schepen is niet in lijn met de verwachte klimaateffecten: op termijn kunnen kleine schepen juist efficiënter blijken, omdat zij minder vaak bemerkt worden door lage waterstanden. Verdere verbeteringen aan de vaarwegen, inzet van kleinere en lichtere schepen, meer flexibele vaarschema's, combinaties met andere transportmodaliteiten (rail, weg) kunnen als mogelijk maatregelen overwogen worden.

## **3.2 Benedenrivierengebied**

### **Huidige situatie**

Het benedenrivierengebied, of Noordelijk Delta Bekken (NDB) omvat het voormalige estuarium van Rijn en Maas. Aan de zeezijde staat het gebied via de Nieuwe Waterweg in open verbinding met de Noordzee, het zuidelijk deel is door de Haringvlietsluizen van de Noordzee afgescheiden. Het benedenrivierengebied staat onder invloed van de getijdebeweging van de Noordzee. Bij laagwater dringt de zouttong tot in de Hollandsche IJssel door. Sinds de afsluiting van het Haringvliet is het zuidelijke deel van het NDB een zoetwaterbekken, dat belangrijk is voor de voorziening van landbouwwater en drinkwater, en voor het peilbeheer in de polders van West Nederland. In de spaarbekkens van de Biesbosch kan een drinkwatervoorraad van Maaswater aangelegd worden voor een periode van drie maanden.

De Haringvlietsluizen vormen een 'stuurknop' voor de waterbeheersing in het NDB. Als de afvoer van de Rijn bij Lobith lager dan 1700 m<sup>3</sup>/s is blijven de

sluizen gesloten. Verder wordt de waterbeweging zodanig gestuurd, dat de Nieuwe Waterweg tenminste 1500 m<sup>3</sup>/s afvoert om de zoutindringing tegen te gaan. Voor de scheepvaart wordt getracht de laagwaterstand bij de Moerdijk niet te laten dalen onder NAP.

Bij hogere afvoeren dan 1700 m<sup>3</sup>/s worden de sluizen geleidelijk meer geopend. Bij noordwester storm zijn de sluizen uit veiligheidsoverweging gesloten en is regulering van de rivierwaterstand niet meer aan de orde.

Door afsluiten en het huidige sluisbeheer is de getijdeslag in het Haringvliet-Hollandsch Diep en de Biesbosch afgenoem van ca. 2 m tot ca. 0.3 m. Hierdoor zijn brakwatersoorten verdwenen, en is sterke oevererosie opgetreden. Tevens zijn grote hoeveelheden verontreinigd slib in het NDB afgezet.

Mogelijkheden van een (gedeeltelijke) herstel van de getijbeweging in het Haringvliet zijn onderzocht (Bol, 1993; Koeze, 1995). Om de ecologische waarde van het gebied te vergroten zijn alternatieve spuiprogramma's voor de Haringvlietsluizen in onderzoek. Deze streven naar een grotere getijde-dynamiek en laten een flauwe zout-zoet gradiënt in het gebied toe. Op dit moment vindt studie plaats naar de effecten van verschillende beheerscenario's in de MER Beheer Haringvlietsluizen.

### **Veranderingen**

Door de zeespiegelstijging worden de gemiddelde waterstanden hoger. Ondanks het in gebruik nemen van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg zullen ook de extreme waterstanden toenemen. Dit komt mede door de toename van rivierafvoeren. De toename van extreme waterstanden hangt af van het toekomstige spuibeheer in het Haringvliet. Indicatieve berekeningen van het RIZA geven aan dat als gevolg van klimaatverandering de maatgevende waterstanden bij het huidige spuibeheer in de orde van 20 cm kunnen stijgen. Bij een spuibeheer, waarbij de Haringvlietsluizen alleen bij stormvloedsituaties volledig gesloten zijn, ligt de stijging in de orde van 30 cm. De stijging is in beide beheersvarianten stroomopwaarts groter dan bij de kust. De berekeningen gelden voor 2050 onder aanname van de centrale schatting (bijlage 1). Extreme waterstanden hangen mede af van veranderingen in het windklimaat, waarover op dit moment nog geen betrouwbare voorspellingen mogelijk zijn.

Lage delen in het estuarium zullen frequenter overstomen. De sedimentatie zal toenemen, wat tot een verhoging van de bodemligging leidt. Op den duur zal ook verder stroomopwaarts in de rivieren sedimentatie optreden, wat op termijn van tientallen jaren ook in de benedenloop van de grote rivieren tot een verhoging van de waterstanden kan leiden. Bij een gestegen zeespiegel zal het tijdens perioden van lage rivierafvoer moeilijker worden de indringing van de zouttong vanuit de Noordzee te beperken. De veranderingen in rivierbodemhoogte als gevolg van sedimentatie bepalen mede de mate van zoutindringing. Als de rivierbodemhoogte de zeespiegelstijging volgt, zal de zouttong zich maar weinig stroomopwaarts verplaatsen. Door de combinatie van zeespiegelstijging en het vaker optreden van zeer lage rivierafvoer, zal het zoutgehalte bij de huidige inlaatpunten steeds vaker te hoog worden om water in te kunnen nemen voor de watervoorziening van de polders, voor de landbouw en voor drinkwater.

## Gevolgen voor de functies

### **Veiligheid**

De gevolgen voor de veiligheid zijn niet kwantitatief in te schatten. Dat komt omdat extreem hoge waterstanden voornamelijk bepaald worden door stormvloeden. Veranderingen in wind zijn echter niet uit de klimaatscenario's af te leiden. Als gevolg van de bodemdaling van het gebied achter de dijken zal bij een eventuele overstroming vanuit zee of rivier, de inundatiediepte toenemen. Het gevolg is een groter inundatierisico (verwachting economische schade en mogelijk een groter aantal slachtoffers) ook bij gelijkblijvende bezwikkans van de dijken.

### **Natuur**

Zeespiegelstijging kan leiden tot een stroomopwaartse verschuiving van ecoregio's van het inter-getijdegebied. Het is niet duidelijk of dit gevolgen heeft, omdat de sedimentatie de stijging van de waterspiegel (voor een deel) bij kan houden.

### **Watervoorziening regionale gebieden**

Onder de omstandigheden van het huidige spuiprogramma is de zoutindringing als gevolg van de zeespiegelstijging veel sterker in het noordelijk deel (Nieuwe Waterweg en Hollandsche IJssel) dan in het zuidelijke deel achter de Haringvlietdam. Bij het inlaatpunt in het zuidelijke deel, de Bernisse aan het Spui, is in dat geval de beperking voor waterinname bij veranderd klimaat marginaal. Heel anders wordt de situatie voor de waterinname vanuit de Hollandsche IJssel. Door de verdere indringing van de zouttong in het noordelijke deel zal de minimale Rijnafvoer waarbij het zoutgehalte voldoende laag is om water in te kunnen nemen ongeveer 200 m<sup>3</sup>/s hoger liggen. Daarbij komt nog dat lage Rijnafvoeren bij veranderd klimaat juist vaker zullen optreden. Door de combinatie van deze effecten kan de waterinname hier in de loop van de komende eeuw gemiddeld gedurende enkele weken per jaar onmogelijk worden.

### **Maatregelen**

De gevolgen van klimaatveranderingen en de eventuele noodzaak tot maatregelen zullen afhangen van het spuiprogramma dat voor het Haringvliet geïmplementeerd zal worden. Aangenomen kan worden dat de gevolgen van klimaatverandering bij een verdere openstelling van de Haringvlietsluizen met name in het zuidelijke deel groter zullen zijn dan bij het huidige spuiprogramma. Om hogere waterstanden op te vangen biedt het creëren van ruimte in het benedenrivierengebied geen oplossing. In het meest westelijke deel worden de waterstanden voornamelijk bepaald door het getij en de wind, en het versterken van de dijken lijkt hier dan naast het frequenter sluiten van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg de enige optie. Een verdere indringing van de zouttong zou stroomopwaartse verplaatsing van waterinnamepunten noodzakelijk kunnen maken.

Het gecombineerde effect van verschillende spuiprogramma's met klimaatveranderingen is niet in kwantitatieve termen bekend. In de MER Beheer Haringvlietsluizen worden de gevolgen van alternatieve spuiprogramma's geëvalueerd. Hierin zijn de effecten van klimaatveranderingen (zeespiegelstijging en veranderde rivieraafvoer) niet meegenomen. In een toekomstige studie zal daarom nagegaan moeten worden in hoeverre de spuiprogramma's onder veranderde klimaatomstandigheden aan de voor het benedenrivierengebied gestelde randvoorwaarden omtrent waterbeweging, zoutindringing en morfologische processen kunnen voldoen.

### 3.3 IJsselmeergebied

Het IJsselmeergebied, inclusief de randmeren, Markermeer, het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal, vormt een systeem dat bestaat uit 6 boezems.

#### 3.3.1 Huidige situatie

##### IJsselmeer

Het IJsselmeer vormt een zoetwaterbekken, dat een belangrijke rol heeft bij de waterhuishouding van Noord-Nederland. Voor de watervoorziening van de provincies Friesland, Groningen, Drenthe en Noord-Holland wordt water ontrokken vanuit het IJssel- en Markermeer. Tijdens perioden van wateroverlast wordt overtollig water geloosd op het IJsselmeer. Daarmee heeft het IJsselmeersysteem ook een rol ten aanzien van de veiligheid van de omliggende poldergebieden. De hydrologie en het hiermee samenhangende meerpeil vormen de voornaamste randvoorwaarde voor de functies van het IJssel- en Markermeer. Het meerpeil wordt voor het belangrijkste deel bepaald door de instroom van water uit de IJssel en de afvoer via spuisluizen in de Afsluitdijk. Het spuien vindt plaats onder vrij verval tijdens laagwater op de Waddenzee. De hoeveelheid water die dagelijks gespuid kan worden is afhankelijk van het verschil in de buitenwaterstand op de Waddenzee en de binnenwaterstand op het IJsselmeer. Wind heeft door opwaaiing van water een belangrijke invloed op de mogelijkheid om te kunnen spuien. De gemiddelde waterbalans van het IJsselmeer is weergegeven in tabel 1. Deze toont dat de grootste invoerterm de afvoer vanuit de IJssel (en de Vecht) is, en de grootste uitvoerterm de hoeveelheid water die op de Waddenzee gespuid wordt.

Tabel 1 Globale waterbalans ( $m^3/s$ ) van het IJsselmeer (gemiddeld over 1976-1993). Winterhalfjaar = oktober-maart, zomerhalfjaar = april-september.

	winterhalfjaar in	zomerhalfjaar uit
IJssel + Vecht	500	410
neerslag	32	27
uitslag polders	55	22
spuien op Waddenzee	650	325
verdamping	10	40
innname polders	4	40
afvoer/aanvoer Markermeer	35	70
restterm	40	16

In de huidige situatie wordt in het winterhalfjaar een streefpeil gehanteerd van -0.40 m t.o.v. NAP, om een voldoende bergingscapaciteit te hebben om overtollig water vanuit de omliggende gebieden en de IJssel op te vangen, zonder dat extreem hoge peilen optreden. In de zomer is het streefpeil -0.20 m t.o.v. NAP; dit hogere peil is om een voldoende grote zoetwatervoorraad te hebben om in de waterbehoefte van de omliggende gebieden te voorzien. Omdat extreem hoge peilen in de zomer niet voorkomen heeft dit hogere streefpeil geen nadelige gevolgen voor veiligheid. De aanvoer van water vanuit de omliggende poldergebieden is afhankelijk van de neerslag.

## **Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal**

De beide kanalen, die een aaneengesloten watersysteem vormen, zijn een belangrijke verbinding voor de scheepvaart tussen de industriegebieden van Velsen/IJmuiden, Amsterdam, Utrecht en het achterland.

Daarnaast hebben zij een functie bij de waterhuishouding van Midden-West-Nederland. Overtollig water vanuit de boezemsystemen in Utrecht, Noord- en Zuid-Holland wordt via deze kanalen in IJmuiden naar zee afgevoerd met behulp van een spuisluis en gemaal. Spuimogelijkheden zijn afhankelijk van de waterstand op zee. Indien gespuid kan worden, is de spuicapaciteit  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . De gemaalcapaciteit is  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ . Gemiddeld over het jaar bedraagt de afvoer ca.  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ . Op de kanalen wordt een gemiddelde waterstand van NAP-0,40 m gehandhaafd.

### **3.3.2 Veranderingen**

#### **IJsselmeer**

Klimaatverandering heeft effect op verschillende onderdelen in de waterbalans van het IJsselmeer. Enerzijds zijn het de klimatologische variabelen zelf (neerslag, verdamping, wind), anderzijds stijgt de zeespiegel en verandert de afvoer van de IJssel en de Vecht. Omdat op dit moment geen betrouwbare voorspellingen omtrent veranderingen in het windklimaat mogelijk zijn, gelden de veranderingen ten aanzien van het IJsselmeer onder aanname van gelijkblijvend windregime. Het is wel zo dat een eventuele toename van de wind, of een draaiing van de windrichting bij stormen naar meer west-noordwestelijke richting tot hogere extreme meerpeilen kan leiden.

De veranderingen in de hydrologie van het IJsselmeer zijn voor het grootste deel bepaald door de zeespiegelstijging. Hierdoor neemt de spuicapaciteit van de sluizen in de Afsluitdijk af. Dit zal voor de wintersituatie resulteren in hogere waterstanden, zowel gemiddelden als ook de extremen nemen toe (zie tabel 2). Het huidige winterstreefpeil van NAP - 0,40 m zal met de huidige infrastructuur niet meer gehandhaafd kunnen worden. Omdat het huidige zomerpeil hoger is dan het winterpeil is in de zomer de spuicapaciteit hoger. De stijging van het huidige gemiddelde peil als gevolg van de zeespiegelstijging is daardoor in de zomer gering. In het zomerhalfjaar zullen perioden met zeer geringe aanvoer van water via de IJssel vaker en langduriger optreden. Dit heeft tot gevolg dat het waterpeil dan onder het streefpeil zakt. Daarnaast zullen er in de zomer, net als onder de huidige omstandigheden, ook situaties kunnen voorkomen waar het streefpeil tijdens afvoerpieken van de IJssel wordt overschreden.

Tabel 2 Toename in IJsselmeerpeil (in m) bij verschillende scenario's.

scenario	toename gemiddeld meerpeil (m)		gemiddelde toename jaarmaxima meerpeil (m)	
	zomer	winter	zomer	winter
centrale schatting, 2050	0.02	0.10	0.13	0.19
extreme schatting, 2050	0.05	0.25	0.29	0.40
centrale schatting, 2100	0.08	0.34	0.37	0.49

## **Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal**

Analoog aan het IJsselmeer zullen de spuimogelijkheden in IJmuiden door de zeespiegelstijging afnemen. Om de kanalen op het huidige peil te kunnen handhaven zal vaker en meer water via het gemaal moeten worden afgevoerd. Hoge waterstanden en wateroverlastsituaties zullen in toekomst frequenter optreden.

### **3.3.3 Gevolgen voor de functies**

#### **Veiligheid**

De gevolgen van de hogere (extreme) winterpeilen zijn in de eerste plaats van belang voor de veiligheid van het gebied rond het IJsselmeer, omdat de hydraulische belasting van de IJsselmeerdijken toeneemt. Daarnaast kunnen de omliggende poldergebieden zonder uitbreiding van de gemaalcapaciteit minder boezemwater uitmalen, waardoor hier wateroverlast kan ontstaan. In het zomerhalfjaar kunnen als gevolg van de geringere aanvoer van rivierwater gecombineerd met mogelijk een grotere watervraag problemen ontstaan voor de watervoorziening van de omliggende gebieden vanuit het IJsselmeer.

Hogere (extreme) waterstanden van het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal zijn met name van belang voor de veiligheid van de poldergebieden van Amstelland-West, dat met de kanalen in open verbinding staat. Zakkende en instabiele boezemkaden ten gevolge van bodemdaling vergroten de kans op wateroverlastsituaties.

#### **Scheepvaart**

Voor de scheepvaart op het IJsselmeer is relevant of tijdens vorstperioden de ijsdikte het varen nog toelaat, zonder dat beschadiging van beschoeiing en kunstwerken optreedt. Varen met ijs wordt bemoeilijkt als de ijsdikte meer dan 5-7 cm bedraagt. Langdurige perioden met droogte/lage afvoeren en vorstperioden zijn als klimaatvariabelen van belang. Varen op het IJsselmeer in konvooi met behulp van een ijsbreker is mogelijk als de ijsdikte minder dan 12 cm is.

Op het Amsterdam-Rijnkanaal zal de scheepvaart in beperkte mate frequenter gehinderd kunnen worden door hoge waterstanden in verband met doorvaarthoogten onder bruggen.

### **3.3.4 Maatregelen**

Door Rijkswaterstaat is een studie, project Waterhuishouding in het Natte Hart, gestart naar het in de toekomst (2025, 2050) gewenste peilbeheer in het IJsselmeergebied, het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal. In deze studie worden de mogelijke maatregelen combinaties (opties voor de waterhuishoudkundige infrastructuur, inrichtingsmaatregelen en beheersstrategie) en hun gevolgen verkend. Daarbij wordt rekening gehouden met de functies van deze watersystemen, wensen van belanghebbenden, wijziging van de externe omstandigheden (klimaateffecten) en wijzigingen in de inrichting van de watersystemen.

Als voorbeelden van maatregelen in het kader van de veiligheid rond het IJsselmeer zijn denkbaar: het vergroten van de spuicapaciteit, het plaatsen van een gemaal om ook te kunnen spuien bij een hogere buitenwaterstand, het aanleggen van vooroevers om de golfoploop te beperken, en het verhogen van dijken.

Voor het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal zal op termijn uitbreiding van de gemaalcapaciteit nodig zijn.

#### 4. REGIONALE WATERSYSTEMEN

De regionale waterhuishoudkundige systemen van Nederland zijn gelegen buiten de grote Rijkswateren. Hieronder valt het landelijk en stedelijk gebied met inbegrip van de kleine oppervlaktewateren en het grondwater. Deze systemen zijn op verschillende manieren verder onder te verdelen. In geografische zin is er onderscheid te maken tussen de systemen van het Zuid-Limburgs heuvelland en de rest van Nederland. De rest is dan weer onder te verdelen in de hoge zandgronden met vrije afwatering (Pleistoceen Nederland) en de klei- en veengebieden langs en tussen de grote rivieren en de polders met bemaling in West en Noord Nederland. De waterhuishoudkundige systemen zijn hydrologisch te splitsen in oppervlaktewatersystemen (stromend water van beken en rivieren; kanalen, grachten, en sloten; meren en plassen) en grondwater systemen. De grondwatersystemen stromen van hooggelegen infiltratiegebieden naar lager gelegen ontwaterende gebieden met oppervlaktewateren. In laag Nederland kan het oppervlaktewater het grondwater ook voeden (boezemwateren). Een andere verdeling van de regionale systemen is op basis van het landgebruik rond de watersystemen: landbouw, stedelijke bebouwing en infrastructuur, recreatie en natuur. Elke bestemming vraagt een andere waterhuishouding. De cultuurgebieden kennen een sterk aangepaste waterhuishouding, de natuurgebieden meestal en bij voorkeur niet.

Effecten van de bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatverandering op de waterhuishouding van de regionale watersystemen in Nederland zijn met hydrologische modellen gekwantificeerd (Vermulst et al, 1997). Daarnaast zijn de gevolgen voor de landbouw en de grondwaterafhankelijke natuur berekend. Door de ruimtelijke schaal waarmee de modellen gerekend hebben geven de resultaten geen inzicht in de lokale effecten en verschillen. De kaarten geven een gemiddeld effect weer. Er moet rekening mee gehouden worden dat lokale verschillen aanmerkelijk kunnen zijn.

Voor de functies, waarvoor geen berekeningen zijn gemaakt, zijn de gevolgen alleen in kwalitatieve zin beschreven.

Bij de modelberekeningen is aangenomen dat de watervoorziening in de zomarmaanden geen beperkingen oplevert<sup>1</sup>. De modelberekeningen hebben betrekking op de volgende processen en functies:

- verandering van grondwaterstanden;
- veranderingen in het kwel-en wegzijgingspatroon en de sterkte van kwel en wegzijging;
- verandering in afvoer en daarmee samenhangend het waterbezwaar vanuit de polders;
- verandering in de zoutbelasting van het oppervlaktewater door kwel van brak grondwater;
- verandering van de natuurwaarde van de verdrogingsgevoelige natuur;
- verandering in de opbrengstderving in de landbouw door verandering in de waterhuishouding.

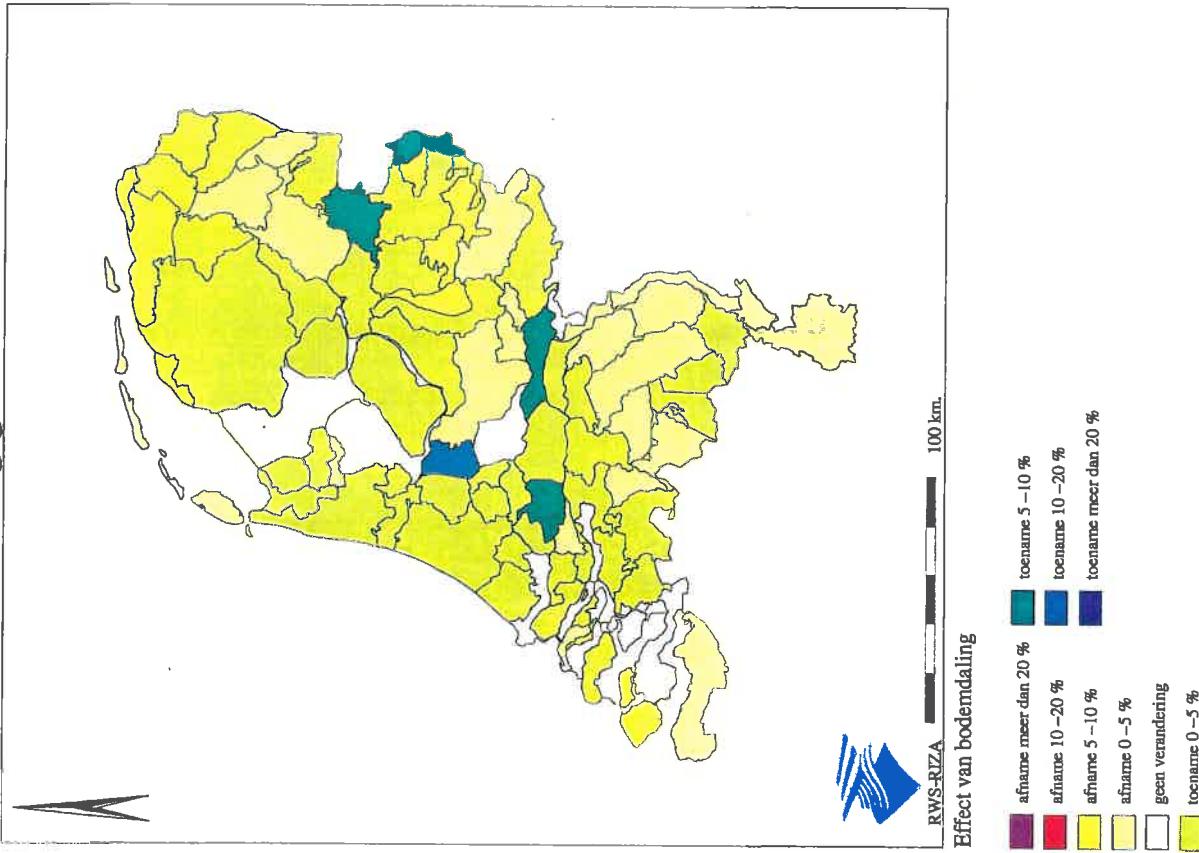
In het kader van deze rapportage zijn twee varianten doorgerekend:

- 1 effecten van de verwachte bodemdaling in 2050;
- 2 effecten van de verwachte bodemdaling in 2050 in combinatie met de effecten van een versterkt broeikaseffect in de vorm van een veranderde neerslag en verdamping en een zeespiegelstijging. De aangenomen klimaatverandering komt overeen met de centrale schatting van het IPCC voor het jaar 2050 ( $1^{\circ}\text{C}$  temperatuurstijging, zie bijlage 1).

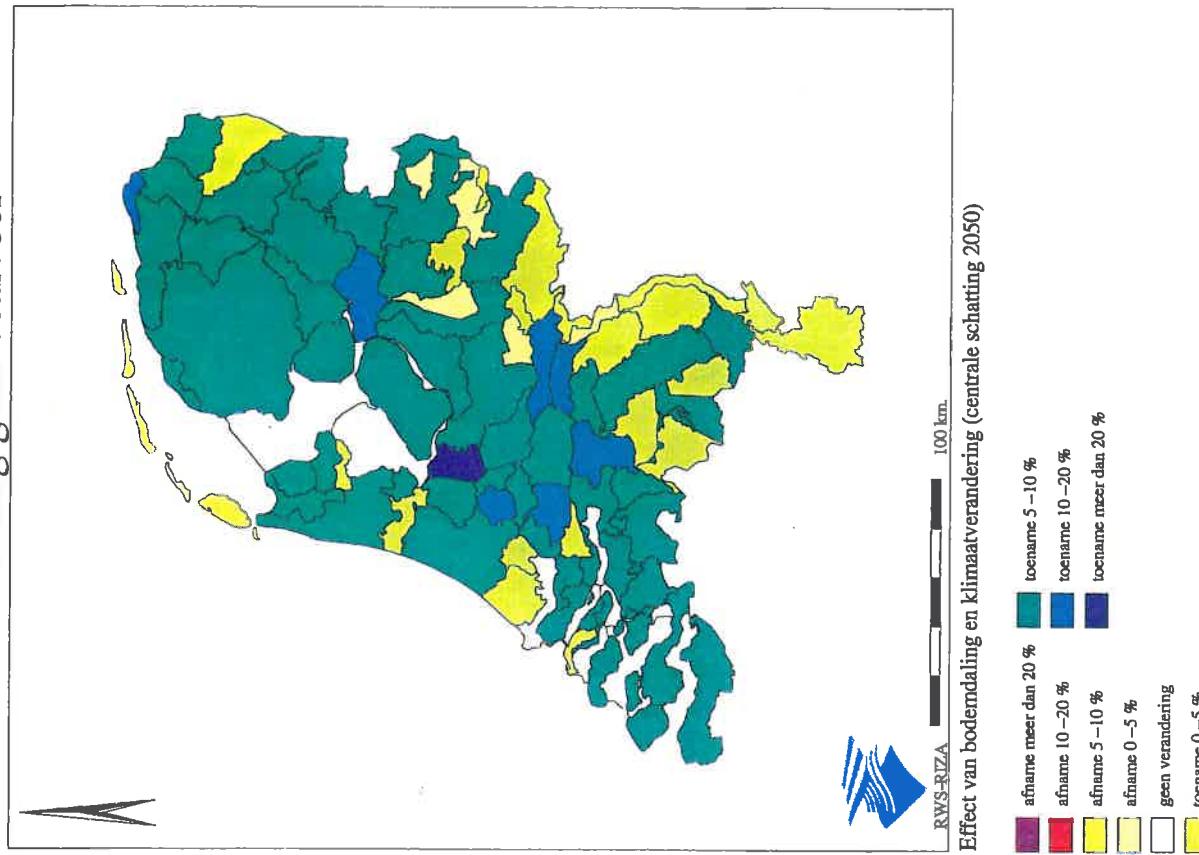
---

<sup>1</sup> zoals in §3.2 is aangegeven zijn in de toekomst langere perioden van droogte te verwachten, met mogelijk verminderde beschikbaarheid van Rijnwater in de zomer

Kaart 4: Verandering gebiedsafvoer

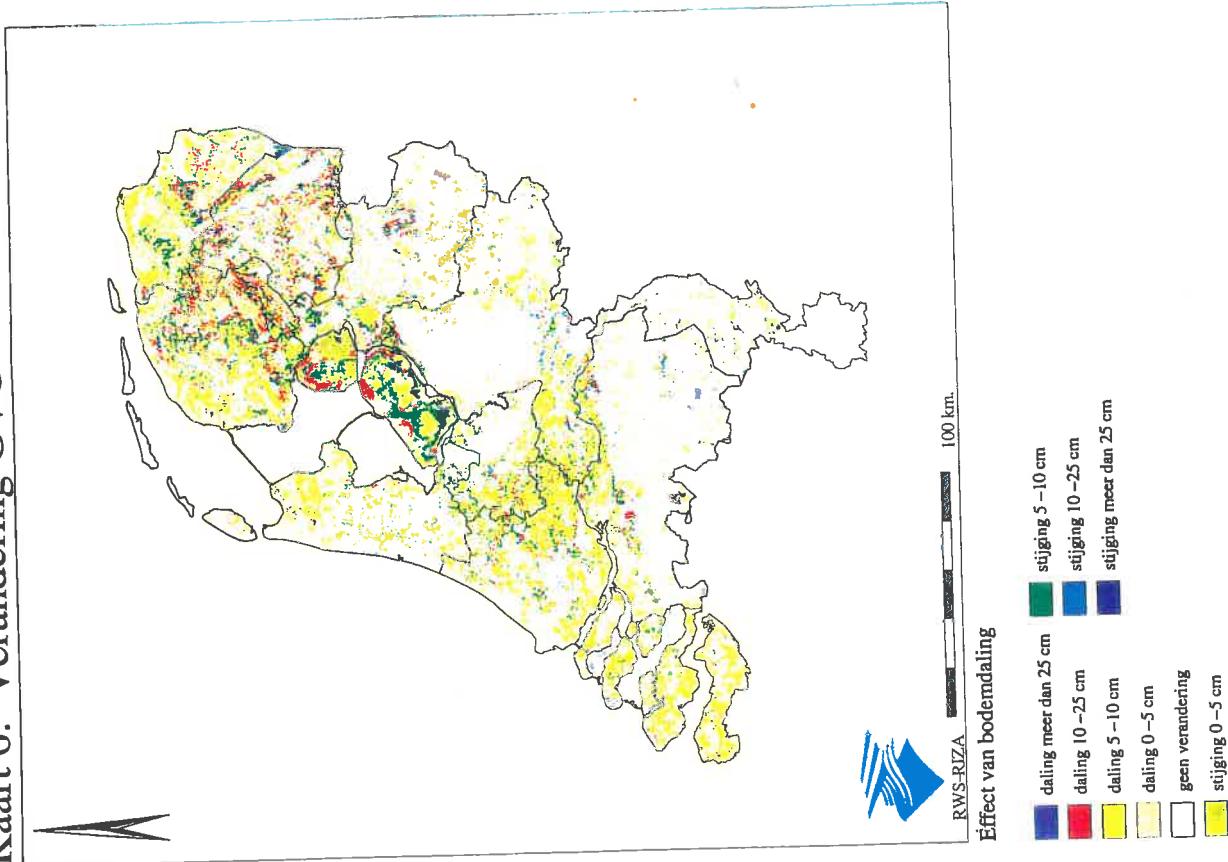


Kaart 5: Verandering gebiedsafvoer

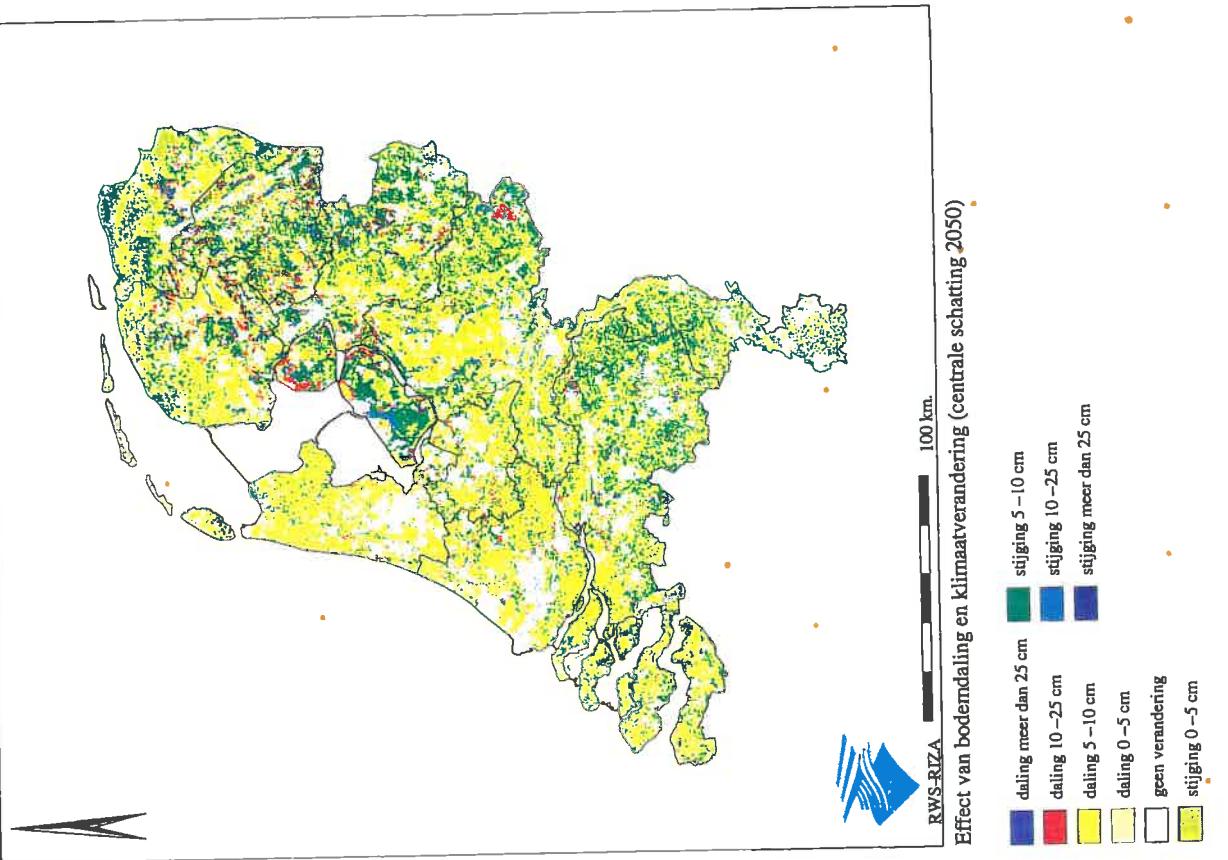


kaarten 6 en 7

Kaart 6: Verandering GVG



Kaart 7: Verandering GVG



De bij deze berekeningen gehanteerde uitgangspunten zijn weergegeven in bijlage 4.

## 4.1 Beeksystemen

### 4.1.1 Huidige situatie

Beeksystemen kenmerken zich door een in principe vrije afwatering van oppervlakkig of via grondwater aangevoerd regenwater. Peilbeheersing, ondermeer met behulp van stuwen is in deze watersystemen beperkt mogelijk. De grondwaterstand wordt grotendeels bepaald door de diepte en dichtheid van de watergangen. Beeksystemen bestaan uit hoger (en droog) gelegen infiltratiegebieden en laag gelegen kwelgebieden.

#### Afwatering

Om wateroverlast te voorkomen is de afwatering in het landelijk gebied bij de uitvoer van ruilverkavelingsprojecten sterk geïntensiveerd. De afwateringsmiddelen (sloten, beken, vaarten, gemalen) zijn gedimensioneerd op basis van de maatgevende afvoer. Dit is de dagafvoer, die gemiddeld met een frequentie van 1 à 2 maal per jaar wordt overschreden. De neerslag in de winterperiode is hier maatgevend. Zo'n afvoer wordt in de regel in een natte periode in enkele dagen bereikt. Het waterbeheersysteem moet zorgen voor voldoende drooglegging. De helling, hoogteligging en de grondsoorten in een gebied bepalen de dichtheid en dimensies van de ont- en afwateringsinfrastructuur. In de praktijk toegepaste ontwateringsnormen zijn stationaire afvoer per dag van 5 à 10 mm (bebouwde terreinen 10 mm, sportvelden 15 mm, woongebieden 5 mm, bouwland 7 mm). De geïntensieveerde afwatering heeft geleid tot verdroging van natuurgebieden.

### 4.1.2 Veranderingen

#### Verandering gebiedsafvoer

De bodemdaling (variant 1) zorgt in het algemeen voor veranderingen van minder dan 5% van de gebiedsafvoer (zie kaart 4).

De toename in gebiedsafvoer als gevolg van bodemdaling in combinatie met zeespiegelijzing en klimaatverandering (variant 2, zie kaart 5) is in het zuidoostelijke deel van Nederland ongeveer gelijk aan de toename van het neerslagoverschot (enkele procenten). In een aantal gebieden in Overijssel, Noord-Limburg en de Zuidelijke Veluwe neemt de gebiedsafvoer met enkele procenten af. Deze gebieden komen relatief hoger te liggen, waardoor ze meer water verliezen in de vorm van wegzetting. Voor de overige gebieden is de toename van de gebiedsafvoer 5 à 10%.

## **Verandering grondwaterstanden**

De berekende veranderingen in de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG)<sup>2</sup> voor de varianten 1 en 2 zijn weergegeven in respectievelijk de kaarten 6 en 7. Bodemdaling (variant 1) heeft in beperkte mate effect op de grondwaterstanden in hoog Nederland. In Drenthe zijn effecten zichtbaar in restanten van laagveen in de benedenloop van beekdalen.

Variant 2 leidt tot sterkere stijgingen van de grondwaterstand, over een uitgestrekter areaal dan variant 1. Landelijk treedt een stijging van de GVG op van meer dan 5 cm, in ongeveer 20% van het oppervlak. Een daling van de GVG van meer dan 5 cm treedt op in ongeveer 5% van Nederland. In hoog Nederland is de stijging groter en strekt zich over een groter areaal uit dan het landelijke beeld, omdat de grondwaterstand in hoog Nederland in het algemeen meer bepaald wordt door de neerslag en minder door het oppervlaktewaterpeil. Verder blijkt dat de klimaatverandering zorgt voor grotere verschillen tussen de gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstanden (GHG respectievelijk GLG).

## **Verandering kwel en wegzijging**

De berekende toe-/afname in kwel- en wegzijging voor de varianten 1 en 2 zijn weergegeven in respectievelijk kaarten 8 en 9.

Als gevolg van alleen de bodemdaling (variant 1) neemt de kwel toe met name bij de overgang tussen Holocene en Pleistoceen Nederland. De hoogteverschillen worden groter, waardoor de kwel in de veengebieden en wegzijging in de infiltratiegebieden toenemen.

Door de klimaatverandering (variant 2) neemt de netto neerslag toe, met als gevolg meer wegzijging in infiltratiegebieden en meer kwel in de kwelgebieden. Het effect van de klimaatveranderingen is globaal gezien veel sterker dan dat van de bodemdaling<sup>3</sup>.

## **4.2 Poldersystemen**

### **4.2.1 Huidige situatie**

De waterhuishouding van de poldersystemen kenmerkt zich door een handhaving van één (oppervlaktewater)peil binnen zeer nauwe marges per polder(vak) door bemaling. Hierbij kan verschil bestaan tussen het zomer- en winterpeil. In de zomerperiode kan water via de boezem worden aangevoerd ter compensatie van watertekorten. In de winterperiode wordt het overtollige water uitgemalen op en afgevoerd via de boezem naar 'buiten water' (zee, rivier, IJsselmeer). Het polderpeil bepaalt, binnen bepaalde grenzen, de grondwaterstand binnen de polder (zie pag.42, winter- en zomerpeil). Een boezemsysteem regelt de aan- en afvoer van water naar/uit de inliggende polders. Het aantal polders binnen een boezemsysteem kan variëren van enige tientallen tot enkele honderden. Een polder is in de regel onderverdeeld in diverse peilvakken en/of onderbemalingen met ieder een eigen peil. Het polderpeil ligt doorgaans beneden boezempeil, en deze ligt beneden het peil van het 'buiten water'. Hierdoor ontstaan diverse grondwaterstromen die binnen een polder opkwellen. Dit kwelwater kan zowel zout-, brak- als zoetwater zijn. In geval

---

<sup>2</sup> de GVG is een sterk bepalende factor voor de standplaatsen van grondwaterafhankelijke vegetaties, in het bijzonder voor het voorkomen van karakteristieke plantensoorten)

<sup>3</sup> lokaal kan bodemdaling grote gevolgen voor kwel- en inzijgingsgebieden hebben

van zoute of brakke kwel is het met name in de zomerperiode voor de landbouw van belang dat dit water verdund wordt via doorspoeling met zoet water. Doorspoelen is eveneens noodzakelijk wanneer in de zomerperiode door overmatige algenproductie eutrofiëeringsverschijnselen ontstaan.

## **Peilbeheer**

### **Grondwaterstand**

Door het instellen van het polderpeil in de watergangen wordt een zekere drooglegging bereikt om daarmee in de aangrenzende gronden een gewenste grondwaterstand te realiseren. Door de aanleg van detailontwatering (drainage, onderbemaling) in deze gronden kan een nog fijnere regeling van de grondwaterstand plaatsvinden. In bewoonte gebieden<sup>4</sup> en in agrarische gebieden is de drooglegging in het algemeen groter dan in natuurgebieden. Omdat drooglegging leidt tot verdere bodemdaling (zie §2.3) vindt in de agrarische een grotere bodemdaling plaats dan in de natuurgebieden.

### **Winter- en zomerpeil**

Om in de winterperiode wateroverlast (neerslagoverschot) te voorkomen en 's zomers watertekorten te beperken werd tot voor kort in het algemeen in de winter een lager polderpeil gehanteerd dan in de zomer. De huidige tendens is te komen tot één peil per polder of peilvak.

Veenoxydatie vindt overwegend in de zomerperiode plaats. De grondwaterstand in de zomer is daarmee voor een groot deel bepalend voor de mate van bodemdaling in het veengebied (zie §2.3). De grondwaterstand in de zomer wordt grotendeels bepaald door de hoeveelheid neerslag in de voorjaars- en zomerperiode en de grondwaterstand in het voorjaar. Deze laatste wordt voor een belangrijk deel bepaald door het in de winter en het voorjaar gehanteerde polderpeil. Een hoger zomerpeil heeft een beperkte invloed op de zomergrondwaterstand. Overigens zijn het moment van opzetten van het peil, de aard en mate van drainagemiddelen en de grondsoort mede bepalend voor het effect van peilopzet.

### **Boezempeil**

Aanpassing van het boezempeil vindt veel minder frequent plaats dan van de polderpeilen, omdat veel functies op dit peil zijn afgestemd en de mogelijkheid van afwatering onder vrij verval door het boezempeil wordt bepaald. De huidige peilen in de grote boezemsystemen zijn al decennia lang gelijk. Het verschil tussen een relatief vast boezempeil en een steeds neerwaarts bijgesteld polderpeil neemt daardoor toe.

## **Waterkering**

Voor de niet-primaire waterkeringen bestaan thans nog geen uniforme normen. De provincies ontwikkelen momenteel, in samenwerking met de waterschappen, een methodiek ter bepaling van het gewenste veiligheidsniveau van boezemkaden (Fugro, in voorbereiding). Op basis hiervan kunnen de normen voor kaden worden vastgesteld. De vast te stellen veiligheidsniveaus zullen, naar het zich laat aanzien, kunnen worden verdeeld in 5 klassen met verschillende overschrijdingskansen. Deze lopen op van 1/10 per jaar in gebieden met geringe inundatiediepte en een lage economische waarde tot 1/1000 per jaar in gebieden met grote inundatiediepte en een hoge economische waarde.

---

<sup>4</sup> de problematiek tussen stedelijk en landelijk gebied is verschillend; in landbouwgebieden volgt het peil de maaivelddaling, terwijl in stedelijk gebied verdere daling getracht wordt te voorkomen vanwege schade aan de gebouwen; zetting wordt gecompenseerd door ophoging

#### 4.2.2 Veranderingen

##### **Verandering gebiedsafvoer**

De bodemdaling (variant 1) zorgt in het algemeen voor een lichte toename, minder dan 5%, van de gebiedsafvoer (zie kaart 4). Alleen in het Vechtplassengebied treedt een grotere procentuele verandering op. Dit komt omdat in dit gebied in de uitgangssituatie maar weinig water uitgemalen wordt. Een (absoluut gezien) kleine verandering van de afvoer zorgt dan voor een grote procentuele verandering.

De verandering in gebiedsafvoer als gevolg van bodemdaling in combinatie met zeespiegelstijging en klimaatverandering (variant 2, zie kaart 5) leidt gemiddeld tot een toename van de gebiedsafvoer die iets sterker zijn dan de toename van het neerslagoverschot, 10 tot meer dan 20%. Behalve de extra neerslag zorgen in deze gebieden ook de zeespiegelstijging en de relatief sterke bodemdaling voor extra gebiedsafvoer. De bodemdaling en zeespiegelstijging leiden niet alleen tot extra waterbezaar in de polders, maar soms ook tot verminderde afvoermogelijkheden. Zo heeft recent onderzoek in Friesland (Waterschap Friesland, 1997) uitgewezen dat bij een zeespiegelstijging van 30 cm de spuicapaciteit van de Friese boezem naar de Waddenzee met 10-20 % zal afnemen.

Berekeningen ten aanzien van piekafvoer zijn niet gemaakt. Ervan uitgaande dat piekafvoer door de neerslag in de winterperiode, wanneer de bergingscapaciteit in de grond minimaal is, bepaald wordt, kan als eerste orde benadering aangenomen worden dat de toename van de piekafvoer evenredig is aan de toename van de 10-daagse neerslagsommen. Deze liggen in de orde van 10% toename voor het jaar 2050 (zie bijlage 1).

##### **Verandering grondwaterstanden**

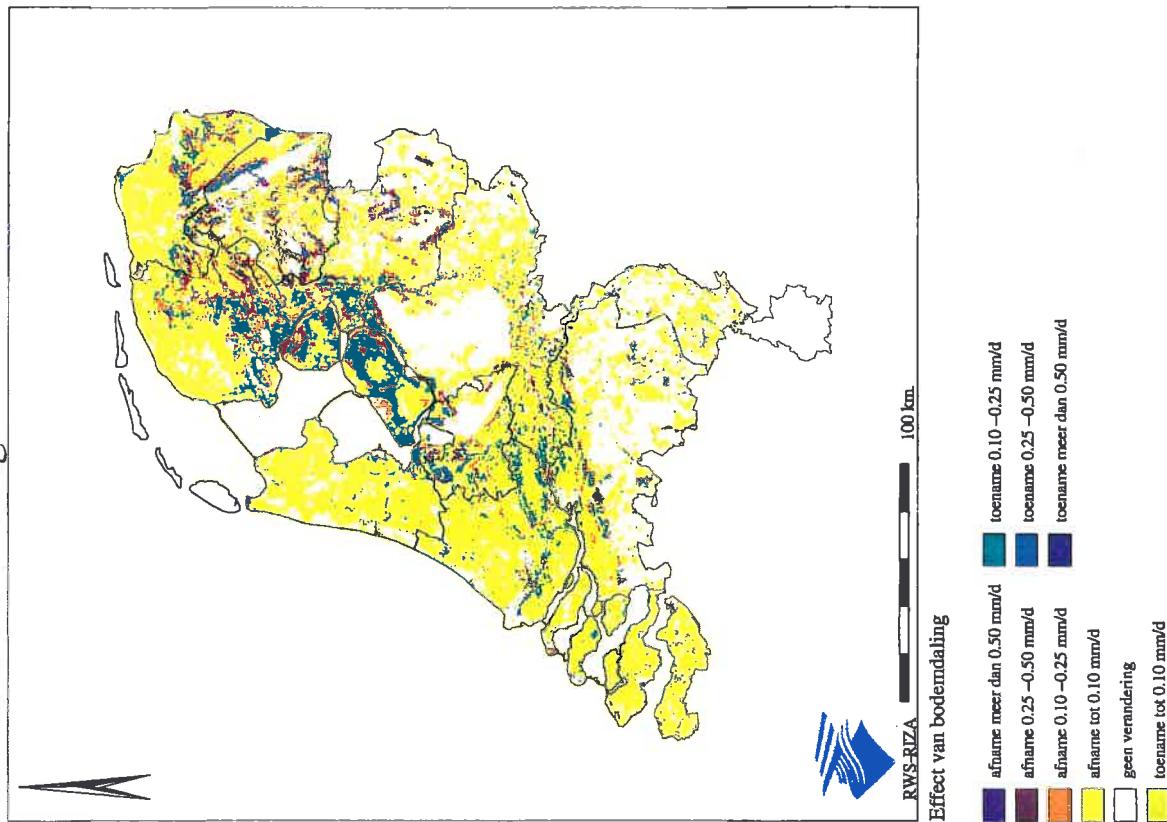
De berekende veranderingen in de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) voor de varianten 1 en 2 zijn weergegeven in respectievelijk de kaarten 6 en 7.

Variant 1 leidt voornamelijk in het Holocene deel van Nederland, en dan met name in Flevoland, Groningen en Friesland, tot stijgingen van de grondwaterstand. Dit wordt veroorzaakt door hogere zee- en IJsselmeerniveaus, gecombineerd met bodemdaling. Hierbij is ervan uitgegaan dat er geen aanpassing van het ontwateringsstelsel plaatsvindt.

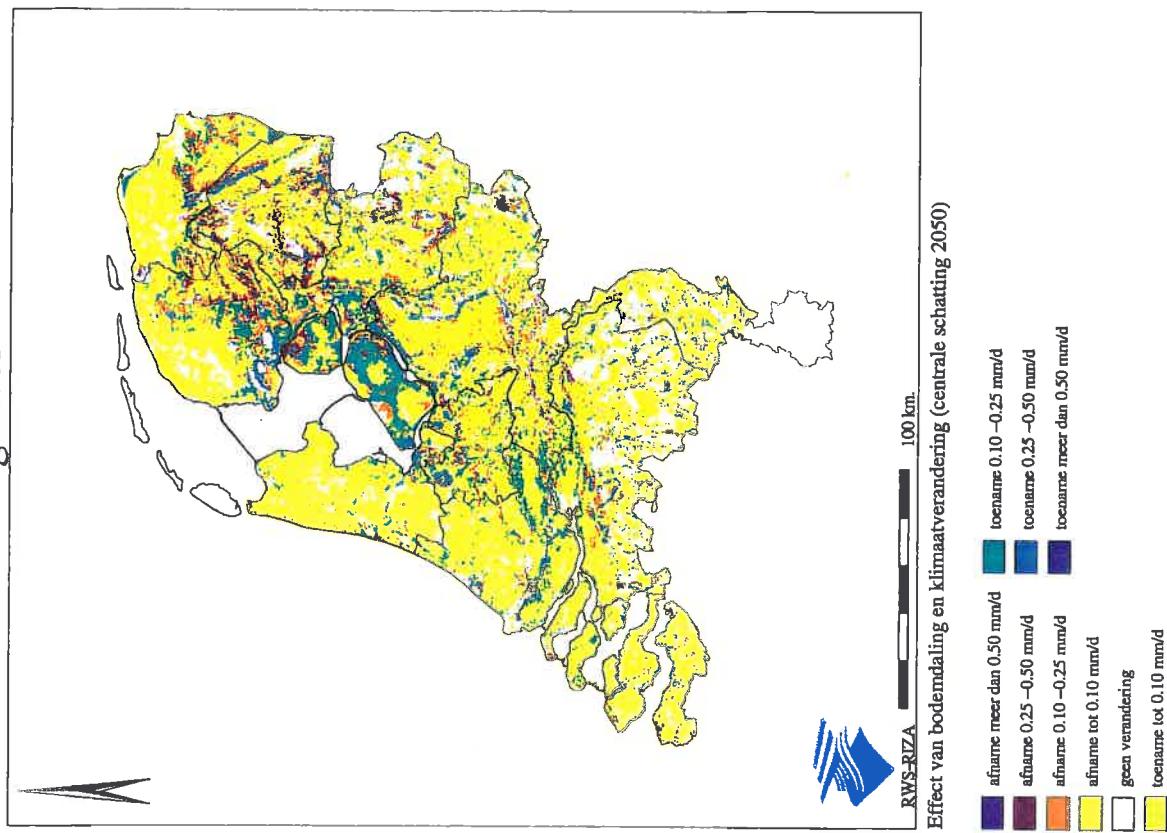
Variant 2 leidt tot sterkere stijgingen van de grondwaterstand, over een uitgestreker areaal dan variant 1. Landelijk treedt een stijging van de GVG op van meer dan 5 cm, in ongeveer 20% van het oppervlak. Een daling van de GVG van meer dan 5 cm treedt op in ongeveer 5% van Nederland. In laag Nederland is de stijging minder sterk en strekt zich over een kleiner areaal uit dan het landelijke beeld, omdat de grondwaterstand in laag Nederland in het algemeen meer bepaald wordt door het oppervlaktewaterpeil en minder door de neerslag. Verder blijkt dat de klimaatverandering zorgt voor grotere verschillen tussen de gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstanden.

Uit een analyse van de berekende diepe stijghoogten volgt dat het effect van de zeespiegelstijging alleen is terug te vinden in de directe omgeving van de Noordzeekust, het IJsselmeer, het benedenrivierengebied en het Deltagebied.

Kaart 8: Verandering kwel



Kaart 9: Verandering kwel



### **Verandering kwel en wegzijging**

De berekende verandering in de verticale fluxen (toe-/afname kwel of wegzijging) voor de varianten 1 en 2 zijn weergegeven in respectievelijk kaarten 8 en 9.

Als gevolg van alleen de bodemdaling (variant 1) neemt de kwel met name toe bij de overgang tussen Holoceen en Pleistoceen Nederland. De hoogteverschillen worden groter, waardoor de kwel in de veengebieden en wegzijging in de infiltratiegebieden toenemen. Verder neemt in laag Nederland het hoogteverschil tussen veenweidegebieden en droogmakerijen af, waardoor zowel de wegzijging in de veengebieden als de kwel in de droogmakerijen iets afnemen. Variant 2 heeft met name in de directe omgeving van de Noordzeekust, het IJsselmeer, de grote rivieren en in het Deltagebied grotere effecten dan variant 1. Dit is, met uitzondering van de duinen, toe te schrijven aan de effecten van klimaatverandering op de waterstanden van deze systemen.

### **Verandering zoutbezaar vanuit het diepe grondwater<sup>5</sup>**

Op kaart 10 is voor de huidige situatie het zoutbezaar van het oppervlaktewater weergegeven. Het zoutbezaar is gedefinieerd als de gemiddelde chloride-vracht vanuit het diepe grondwater voor een afwateringseenheid, uitgedrukt in kg per ha per jaar. De chloride-vracht is bepaald door voor alle kwelgebieden de chloride-concentratie van het ondiepe grondwater (enkele meters diepte) te vermengvuldigen met de kwelintensiteit. Gebieden met een aanzienlijk zoutbezaar (meer dan 1000 kg per ha per jaar) komen voor in Zeeland, de kop van Noord-Holland, het noorden van Friesland en Groningen, plaatselijk in Flevoland en in enkele droogmakerijen in Noord- en Zuid-Holland. Een zoutbezaar van 1000 - 2000 kg per ha per jaar leidt zonder doorspoeling, afhankelijk van de hoeveelheid kwel, tot gemiddelde chlorideconcentraties in het oppervlaktewater tussen 100 en 800 mg/l. In verschillende gebieden in Zeeland, de kop van Noord-Holland en het Lauwersmeergebied bedraagt het zoutbezaar meer dan 5000 kg/ha/jaar, in een enkel geval zelfs meer dan 20000 kg/ha/jaar.

Op de kaarten 11 en 12 is de verandering in het zoutbezaar weergegeven, achtereenvolgens als gevolg van variant 1 en variant 2. Het zoutbezaar neemt toe doordat in kwelgebieden de kwel toeneemt of doordat in gebieden de wegzijging omslaat naar kwel. Toename van het zoutbezaar is onafhankelijk van de aard van de kwel (lokaal of regionaal). Alle typen kwel voeren chloride mee, dat in het sediment van de (ondiepe) ondergrond vaak ruimschoots aanwezig is.

Variant 1 zorgt voor relatief grote veranderingen in het zoutbezaar. In Zeeland treden veranderingen op van ongeveer 500 kg/ha/jaar (afhankelijk van de kwel overeenkomend met een verandering van de chlorideconcentratie in het oppervlaktewater tussen de 50 en de 200 mg/l). In Groningen, Friesland, Flevoland en de kop van Noord-Holland treden veranderingen op tussen de 10 en 500 kg/ha/jaar. In Zuid- en Noord-Holland is verder te zien dat de droogmakerijen in het algemeen iets minder zoutbezaar krijgen (doordat daar de kwel afneemt) en dat in de omliggende veenweidegebieden het zoutbezaar iets toeneemt (toename van de kwel).

Variant 2 leidt in het algemeen tot iets grotere veranderingen in het zoutbezaar dan variant 1. De extra zeespiegelstijging en de stijging van de peilen in het IJsselmeer en de Zeeuwse Delta leiden tot een extra toename van het zoutbezaar van gebieden in Zeeland, Flevoland, de kop van Noord-

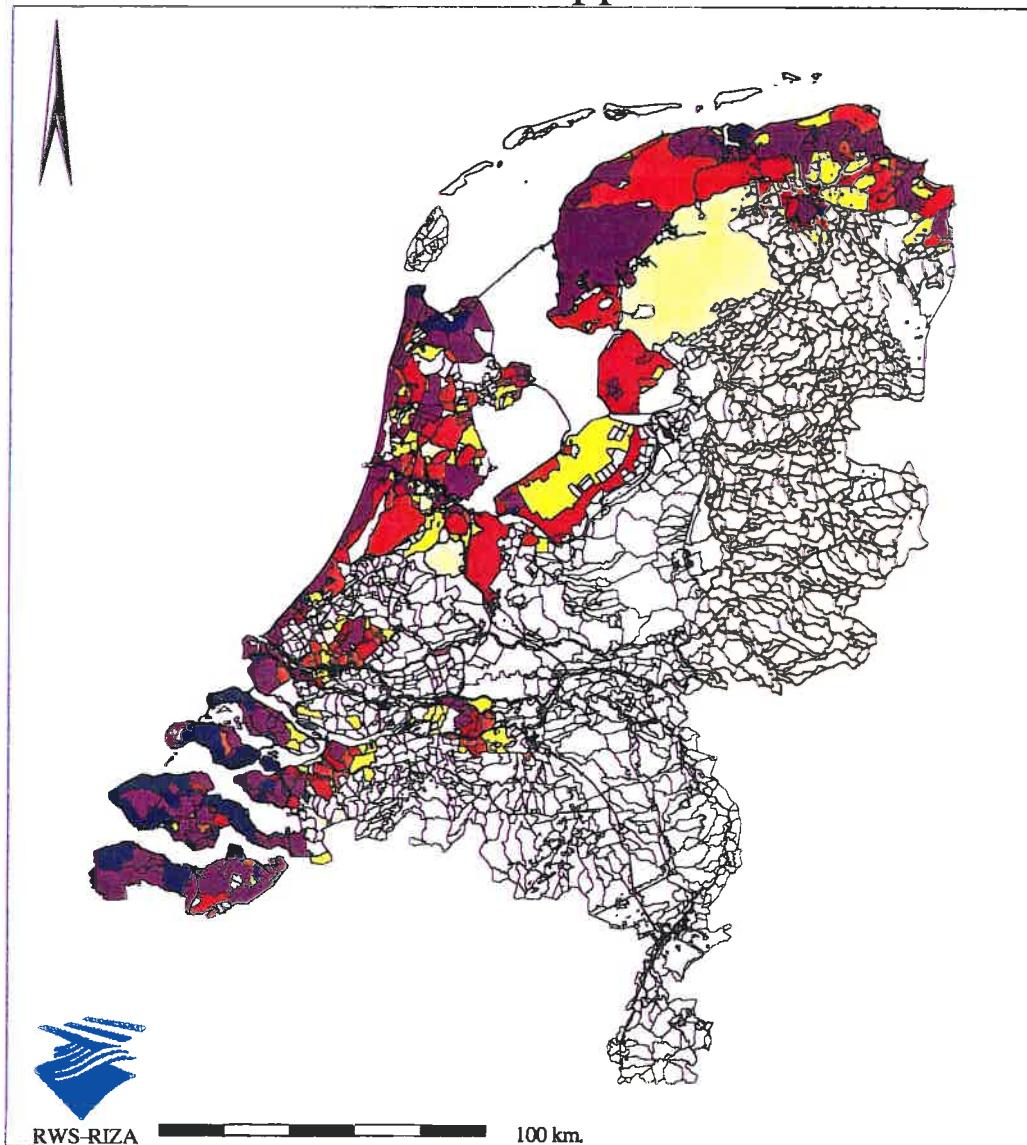
---

<sup>5</sup> verandering van de zoutbezaar door inname van brak/zout oppervlaktewater t.g.v. het binnendringen van de zouttong (zie §3.2) is buiten beschouwing gelaten

Holland, Friesland en Groningen. Anderzijds neemt door de toename van het neerslagoverschot zowel het areaal met infiltratie als de infiltratie in wegzijsingsgebieden toe. Dit leidt in deze gebieden tot een afname van het zoutbezwaar, met name in en rond het duingebied van Noord- en Zuid-Holland.

kaart 10

## Kaart 10: Zoutbezwaar oppervlaktewater



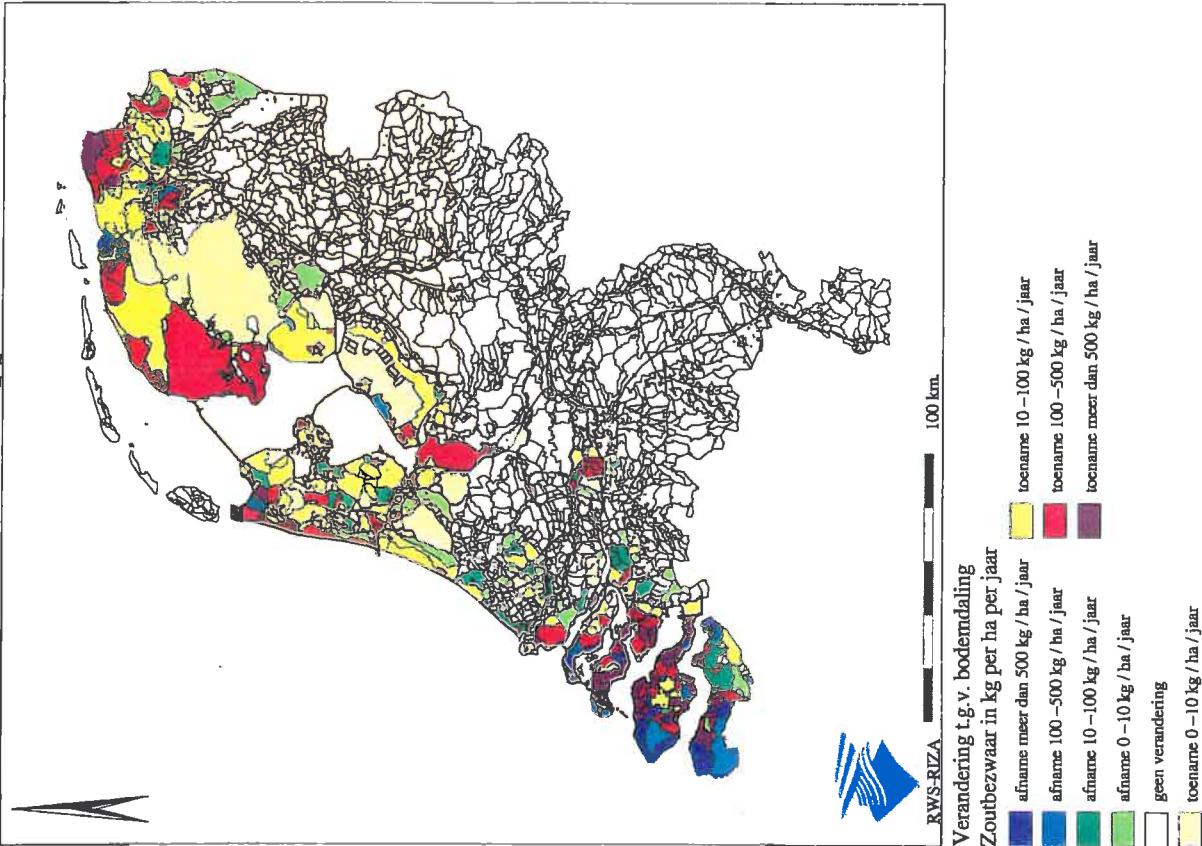
Berekend voor de uitgangssituatie

Zoutbezwaar in kg per ha per jaar

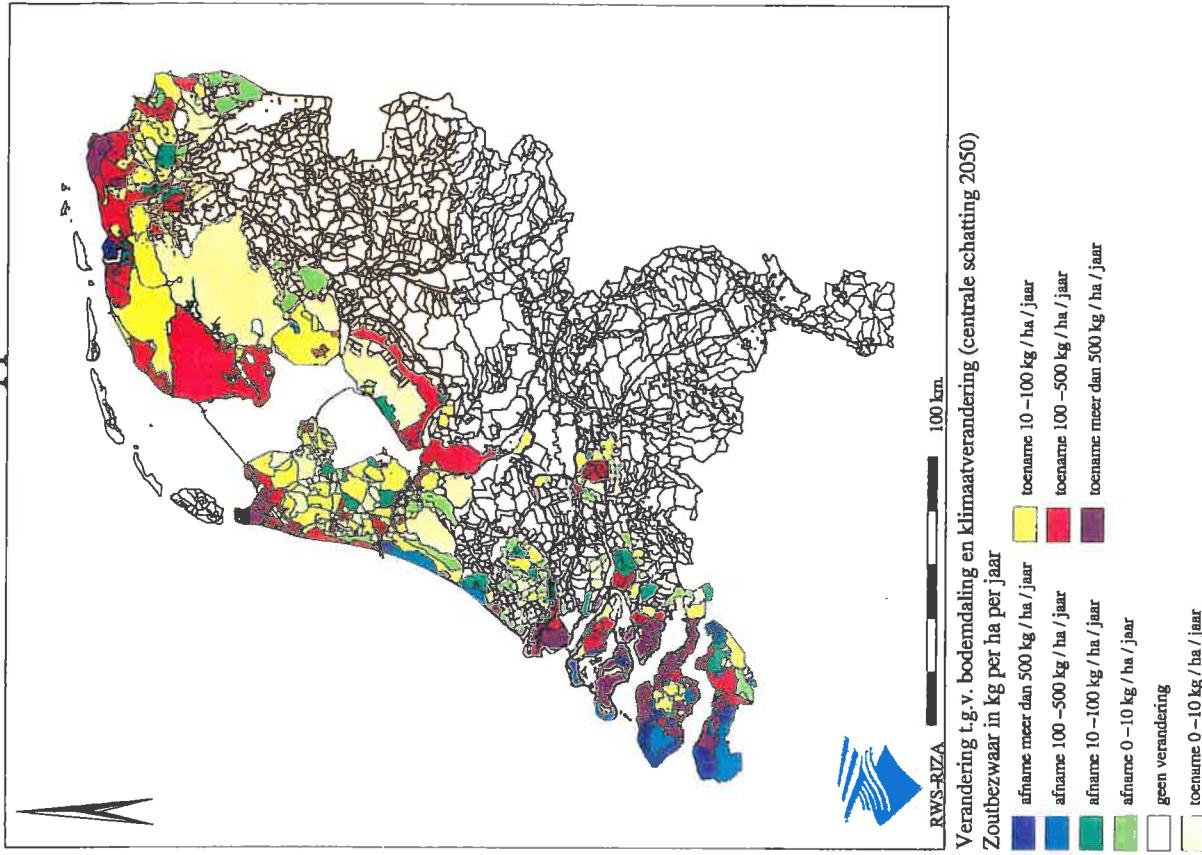
[white square]	minder dan 25 kg / ha / jaar	[dark blue square]	meer dan 5000 kg / ha / jaar
[light yellow square]	25 – 50 kg / ha / jaar		
[yellow square]	50 – 200 kg / ha / jaar		
[red square]	200 – 500 kg / ha / jaar		
[bright red square]	500 – 1000 kg / ha / jaar		
[dark purple square]	1000 – 5000 kg / ha / jaar		

Kaart 11: Zoutbezuur oppervlakteswater

Kaart 12: Zoutbezuur oppervlakteswater



kaarten 11 en 12



### 4.3 Gevolgen voor de functies

#### **Effecten op terrestrische, grondwaterafhankelijke natuur**

De effecten van de varianten 1 en 2 op de verschillende grondwaterafhankelijke ecosystemen zijn met behulp van een model (DEMNAT 2.1) berekend en weergegeven in tabel 3. De effecten hebben betrekking op veranderingen in de vegetatie van (semi)terrestrische ecosystemen (natte/vochtige heide, trilvennen, bloemrijke hooilanden, hoogvenen, e.d.) en oever- en verlandingsvegetatie langs wateren (oevers van sloten, vennen, e.d.). Hierbij is de huidige situatie geschat op 40.000 natuurwaarde-eenheden. Met waterhuishoudkundige maatregelen zijn potentieel 8 à 10.000 natuurwaarde-eenheden te herstellen (= referentie) (Kors et al, 1997).

Tabel 3 Veranderingen in natte natuurwaarden.

	dN	dN/Ntot (%)	dN t.o.v. referentie (%)
Variant 1	-99	0	-1
Variant 2	961	2.4	10 - 12

dN Totale natuurwaardeverandering

Ntot Totale natuurwaardesom in de huidige situatie

Bodemdaling alleen (variant 1) leidt netto tot een geringe afname van natte natuurwaarden. Bodemdaling in combinatie met klimaatsverandering (variant 2) leidt tot een aanzienlijke netto toename van natte natuurwaarden.

#### **Gevolgen voor de landbouw**

De financiële effecten voor de landbouw voor de huidige situatie en de varianten 1 en 2 weergegeven in tabel 4. Hierbij is uitgegaan van het voortzetten van het huidige peilbeheer.

Tabel 4 Financiële effecten<sup>6</sup> voor de landbouw (mln.f per jaar)

Variant	droogteschade	natschade	beregeningkosten	totaal
huidige situatie	267	947	98	1312
variant 1	267	946	98	1311
variant 2	263	997	98	1358

Voor variant 1 treden nauwelijks veranderingen op in de natschade, droogteschade en de kosten van beregening. Variant 2 zorgt voor een toename van de kosten voor de landbouw ten gevolge van een toename van de natschade in het voorjaar. Beregening vindt met name in de zomerperiode plaats; de toename van de neerslag heeft hier een marginale invloed op.

#### **Waterkering**

Bodemdaling leidt in het algemeen tot kruinverlaging van de waterkering. Indien de daling het gevolg is van delfstofwinning of diepe onttrekking dan zakt de kruin van de dijk in gelijke mate als het maaiveld in de onmiddel-

<sup>6</sup> i.v.m. kostenderving t.o.v. een opbrengst bij optimale watervoorziening gedurende het hele jaar

lijke omgeving. Als er sprake is van een meer oppervlakkige oorzaak (klink, zetting en oxydatie van veen) dan zal de kruinzakking minder bedragen dan de bodemdaling in het binnendijksgelegen gebied. Bij de aanleg of verbetering van waterkeringen wordt rekening gehouden met de binnen de planperiode (50 jaar) verwachte bodemdaling. Bij oudere dijken kan dit niet of in onvoldoende mate zijn gebeurd.

Op locaties waar polderpeilverlaging is doorgevoerd kan de stabiliteit van de waterkering afnemen ten gevolge van bodemdaling.

Effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op de wateroverlast zijn beschouwd in §4.1.2 en §4.2.2 onder 'verandering in gebiedsafvoer'.

#### **Afvoer in stedelijk gebied**

De afwatering van stedelijk gebieden wordt bepaald door de frequentie van korte (zomerse) buien met grote neerslagintensiteit (5 minuten neerslagsommen die 1 keer in de twee jaar tot 1 keer in de 25 jaar voorkomen). Hogere neerslagintensiteiten leiden tot frequenter overstromen van de riolen wat tot extra belasting van het oppervlaktewater met afvalstoffen leidt. Het KNMI-scenario (bijlage 1) geeft als indicatie voor verwachte verandering in de 5-minuten neerslag de intensiteit toeneemt met 10%, 20 en 40% bij temperatuurstijgingen van resp. 1°, 2° en 4°C.

#### **Recreatie**

Voor zwemmen is de waterkwaliteit, de watertemperatuur en bewolkingsgraad relevant. Het doorzicht van het water wordt bepaald door eutrofiëring: een verhoogde watertemperatuur geeft in eutrofe wateren sneller en sterkere algenontwikkeling. Een toegenomen (zuurstofvragende) kwell, uitgeslagen op boezemwater, kan dit proces verergeren.

Schaatsen kan bij ijsdikte vanaf 5-7 cm. Het aantal dagen per jaar met deze ijsdikte is een maat voor de mogelijkheden van deze vorm van recreatie. Bijlage 1 geeft aan dat de schaatsrecreatiemogelijkheden zullen afnemen. Het aantal schaatsdagen verandert met een factor van ongeveer 0,65 per graad temperatuurstijging. Binnen de gehanteerde randvoorwaarden van een gelijkblijvende verdeling van extremen geldt voor de kans op Elfstedentochten dezelfde factor.

#### **Cultuurwaarden**

Op plaatsen, waar al sinds vele eeuwen de grondwaterstand ondiep is, is de kans op conservering van prehistorisch materiaal van organische aard het grootst. Deze archeologische vondstplaatsen komen vooral voor in laag Nederland en langs de grote rivieren.

Door grondwaterstandverlaging vergaan organische resten in hoog tempo. In gebieden waar, door peilaanpassing, trapsgewijs dieper ontwaterd wordt worden de vondstplaatsen bedreigd (Groenewoudt, 1994).

Gebouwen met culturele en/of cultuurhistorische waarden kunnen in holocene Nederland schade ondervinden door zetting van slappe gronden (zie 'bebouwing en infrastructuur').

## Bebouwing en infrastructuur

Door bodemdaling kan bebouwing en infrastructuur schade oplopen. Bij bodemdaling door compactie in diepere lagen (bijv. als gevolg van gas- en zoutwinning) betreft het in het algemeen vervangings- of compensatieschade aan waterstaatkundige werken, omdat ze niet langer kunnen voldoen aan de functionele eisen (bijv. bruggen, steigers). Directe technische schade aan constructies en funderingen treedt niet op omdat de bodemdaling van de diepere lagen dan de holocene niet gepaard gaat met grote verschilzakking. Bij bodemdaling als gevolg van zetting, klink en/of oxydatie van ondiepe lagen treden deze zakingsgradiënten (of zettingsverschillen) in het algemeen wel op waardoor daadwerkelijke technische schade kan ontstaan (provincie Friesland, 1997).

### Gebouwen

Bij fundering van gebouwen op staal kan zich bij ondiepe bodemdaling ongeijkmatige zinking voordoen die kan leiden tot scheurvorming. Bij fundering op betonpalen of fundering op staal op een hardere, dieper gelegen zandondergrond kan schade aan kabelaansluitingen ontstaan door verschilzakking. Bij fundering van gebouwen op houten palen kan zich houtrot voordoen, wanneer de grondwaterstand onder de bovenkant van de kop daalt, bijvoorbeeld ten gevolge van peilaanpassingen.

### Wegen

Bij het ontwerp en de aanleg van een weg wordt in het algemeen rekening gehouden met de zetting van de ondergrond en klink van het weglichaam als gevolg van de extra belasting door de weg en de verkeersbelasting. Daardoor zal de zakingscomponent als gevolg van bodemdaling in het algemeen minder zijn dan die van de onmiddellijke omgeving. Desondanks kan deze additionele zinking leiden tot verschilzakkingen en tot technische schade. Vooral bij de overgangen van diepgefundeerde viaducten naar de wegconstructies kan dit aanleiding geven tot ongemak en technische schade.

### Leidingen

In de grond aanwezige leidingen (o.a. riolering) kunnen schade ondervinden ten gevolge van bodemdaling. Hierbij zijn drie aspecten aan de orde. Grote transportleidingen, die in veengebieden in het vrije veld zijn gelegd, kunnen door dunner worden van de veenlaag na verloop van tijd een te geringe gronddekking krijgen. Voorts kan op punten waar leidingen aansluiten op vast gefundeerde objecten of bij kruisingen leidingbreuk optreden. Ten slotte kan het nodig zijn leidingen aan te passen of te verleggen op plaatsen waar compenserende maatregelen voor bodemdaling worden uitgevoerd. Te denken valt aan leidingen die de primaire waterkering kruisen. Bij verhoging van de dijk zullen ook de leidingen in de dijk verhoogd moeten worden.

## 4.4 Maatregelen

### Peilbeheer in relatie tot bodemdaling

#### Scheiding van functies

Compartimentering van peilvakken maakt het beter mogelijk om op specifieke functies toegesneden peilbeheer te voeren. Een gebied met de natuurfunctie kan waterhuishoudkundig gescheiden worden van een gebied met een agrarische functie. Door de inrichting van bufferzones kunnen in het grensgebied de effecten van peilverschillen beperkt blijven.

### **Verweving van functies**

Tegenover het scheidingsmodel staat het verwettingsmodel; daarbij wordt gestreefd naar combinatie van bij elkaar passende functies. Het polderpeil dient op de aanwezige functies te worden afgestemd. Hierbij ontstaan grotere waterhuishoudkundige eenheden, waarbij de regionale verschillen in bodemdaling geringer zijn. De eigenschappen van het watersysteem tezamen met de ruimtelijke bestemmingen en de hieraan gerelateerde functie-eisen bepalen de aanpak in een concreet geval.

### **Functiewijziging**

Zowel scheiding als verweving van functies kan leiden tot functiewijziging: verplaatsing van natuurgebieden of het grondgebruik ten behoeve waarvan de peilverlaging plaatsvindt, zodanig wijzigen dat de noodzaak tot voortdurende peilverlaging vervalt of zich minder frequent voordoet. Hierbij valt te denken aan een verregaande extensivering van de landbouw of het herinrichten van landbouwgebieden tot natuurgebieden.

### **Flexibel peilbeheer**

Grondwaterstandgestuurde peilbeheer zal enig effect hebben op de bodemdaling, maar de toepassingsmogelijkheden daarvoor zijn beperkt. Datzelfde geldt voor dynamisch peilbeheer, dat zich vooral kenmerkt door het toelaten van meer fluctuaties rondom een vastgesteld peilbesluit en vooral verminderen van de inlaat van gebiedsvreemd water tot doel heeft. Indien dit gepaard gaat met langdurige onderschrijdingen van het vastgestelde peil, zal de snelheid van de bodemdaling toenemen, in het bijzonder wanneer peilonderschrijding in de voorjaars- en zomerperiode plaatsvindt.

### **Wateroverlast**

In het rapport 'Waterbergung binnendijks' (Kwakernaak et al, 1996) zijn diverse maatregelen beschouwd op hun effectiviteit op het verminderen van hoogwater met een herhalingstijd van minder dan 10 jaar. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen vrij afwaterende en bemalen gebieden. Zuid-Limburg is hierbij uitgezonderd. Daar zijn met name erosiebestrijdingsmaatregelen effectief, zoals het aanbrengen van groenstroken, strooisellagen en het evenwijdig aan de hoogtelijnen bewerken van het land.

### **Landelijk gebied**

In het algemeen zijn aanleg van bos, ontwikkeling van natte natuur en verandering in ontwatering effectieve maatregelen. Effecten van veranderingen in de afwatering zijn afhankelijk van het watersysteem. Bij vrij afstromende systemen zijn retentiebekkens en herprofileren van de watergangen, waaronder meandering, effectief. Bij bemalen gebieden is met name meer peilvariatie (flexibel peilbeheer) effectief.

### **Stedelijk gebied**

In het stedelijk gebied zijn de aanleg van regenwater- en bufferbassins en het afkoppelen van gerioleerd oppervlak effectief.

### **Verzilting**

Indien een hogere zoutconcentratie in het oppervlaktewater vanwege landgebruik (landbouw) niet acceptabel is, is de meest voor de hand liggende oplossing het doorspoelen met zoet water. Andere mogelijkheden zijn een opisolatie en afvoer van zout water aangepaste inrichting van het waterlopen-

stelsel, of de teelt van minder zoutgevoelige of juist zoutminnende gewassen. (Swart, 1996)

#### **Bebouwing en infrastructuur**

Afhankelijk van de oorzaak van de bodemdaling, de bodemopbouw (funderingsgrondslag), het type constructie en de funderingswijze kan schade (gedeeltelijk) worden voorkomen door compenserende maatregelen. Te denken valt aan het ophogen c.q. verhogen van bijvoorbeeld dijken, kaden, gemalen en bruggen bij bodemdaling door diepe delfstofwinning, en bij klink en oxydatie door veen het aanleggen van hoogwatersloten, aanpassen van funderingen, of (gedeeltelijke) aanpassing of herinrichting van de waterhuishoudkundige infrastructuur (stuwen, gemalen, watergangen).

## 5. KUSTSYSTEMEN

De Nederlandse kust maakt deel uit van een kustvlakte, die zich uitstrekkt van Noord-Frankrijk tot Denemarken. De kust is deels gesloten en voor een deel wordt deze onderbroken door zeegaten. Via de zeearmen en estuaria stromen de grote rivieren af naar zee. Belangrijke afvoerpunten zijn de Westerschelde, de Nieuwe Waterweg en de afwatering via het IJsselmeer in de Waddenzee. De Nederlandse kust is als volgt onder te verdelen:

- het Deltagebied, gekenmerkt door (schier)eilanden, gescheiden door estuaria en zeearmen;
- de Hollandse kust, gekenmerkt door een vrijwel aaneengesloten duinenrij, zonder zeegaten of eilanden;
- het Waddengebied, gekenmerkt door een reeks barrière-eilanden en uitgestrekte wadplaten.

De totale lengte van de Nederlandse kust beslaat 353 km, waarin de duinenkust het grootste aandeel heeft, te weten 254 km. Daarnaast bestaat de Noordzeekust uit zeedijken<sup>7</sup> (34 km), strandvlaktes (38 km, nabij de koppen van de waddeneilanden) en diverse bestemmingen zoals industriegebied (27 km). (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990).

### 5.1 Huidige situatie

#### Sedimentatie- en erosie: zandtransport

Sedimentatie- en erosieprocessen (hoofdzakelijk zand) bepalen de vorm en diepte van de Nederlandse kust. Het getij en de door de wind opgewekte golven hebben een belangrijke invloed op de morfologische processen. De effecten hiervan worden van dieper water naar de kust toe groter. Bij de zeegaten in de Delta en langs de Waddenkust is de interactie tussen rivier en kust merkbaar op de erosie- en sedimentatieprocessen.

Daarnaast wordt met name langs de gesloten Hollandse kust het zand van dieper water opgestuwd richting de kust en vervolgens onder invloed van de noordwaarts gerichte langsstromen verplaatst langs de kust.

Als gevolg van menselijke ingrepen verandert het stromingspatroon voor de kust. Dit manifesteert zich duidelijk bij de afsluiting van de zeegaten in het Deltagebied en bij de Waddenzee (Afsluitdijk, Lauwerszee) en door gas- en zandwinning (Waddenzee). Een van de gevolgen hiervan is dat zich in het Deltagebied in de loop van een tiental jaren een (onderwater)platengebied heeft ontwikkeld, de Voordelta. Ook beïnvloedt de aanleg van havenwerken het stromingsbeeld in de aangrenzende kustvakken.

In de huidige situatie hebben de erosieprocessen langs de kust de overhand. In totaal verdwijnt jaarlijks circa 6 miljoen m<sup>3</sup> zand uit het ondiepe kustgedeelte. Hierbij is variatie langs de kust waarneembaar.

In de Delta vindt opvulling plaats van de oude zeegaten met zand dat uit de onderwateroever komt.

De erosie- en sedimentatieprocessen langs de Hollandse kust ten zuiden van het Noordzeekanaal zijn min of meer met elkaar in evenwicht. Ten noorden van het Noordzeekanaal treedt een netto zandverlies op; zand 'verdwijnt' richting Waddenzee.

---

<sup>7</sup> hierbij zijn de zeedijken langs de Waddenzee en Westerschelde buiten beschouwing gelaten

De grootste hoeveelheid zandtransport vindt plaats richting Waddenzee. De gehele Waddenzee importeert per jaar tussen de 10 en 20 miljoen m<sup>3</sup> zand. Hiervan is 8 miljoen m<sup>3</sup> afkomstig van de Nederlandse kust, het gebied ten westen van Rottum. Met name de zeezijde van de Waddeneilanden en de kop van Noord-Holland erodeert als gevolg van het zandtransport naar de Waddenzee.

#### Zandsuppletie

Ter compensatie van de zandverliezen langs de kust wordt jaarlijks 6 miljoen m<sup>3</sup> zand gesuppleerd vanuit het diepere Noordzeegebied (buiten de 20 meter dieptelijn). Door de wijze van aanbrengen van de zandsuppleties, de erosieverliezen in de diepere kustzone worden niet gecompenseerd, is er alleen sprake van het in stand houden van het bovenste deel van het kustprofiel, de ondiepe kustzone. Dit leidt tot een versteiling van de kust.

## 5.2 Veranderingen

Zeespiegelstijging en veranderingen in het windklimaat veroorzaken veranderingen in stromingspatronen en beïnvloeden daarmee de sedimentatie- en erosieprocessen. Dit betreft zowel de locaties, waar de processen zich manifesteren, als de hierbij verplaatste hoeveelheden zand.

Daarnaast zal in de erosiegebieden door zeespiegelstijging de waterdiepte toenemen, dan wel kunnen deze gebieden onderlopen. In sedimentatiegebieden, met name de Waddenzee, is het de vraag of de sedimentatie de zeespiegelstijging bij kan houden.

Berekend is (zie tabel 5) dat bij een zeespiegelstijging van 60 cm/eeuw 13 miljoen m<sup>3</sup> zand per jaar nodig is om ook het zandverlies op dieper water, om hiermee de versteiling tegen te gaan, te compenseren (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 1995).

Tabel 5 Suppletiebehoefte langs de Nederlandse kust in miljoen m<sup>3</sup> zand per jaar op lange termijn voor drie scenario's zeespiegelstijging (zie §2.2) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996)

zeespiegel-stijging	Deltakust		Hollandse kust		Waddenkust	
	kustnabije zone	totale kustzone	kustnabije zone	totale kustzone	kust nabije zone	totale kustzone
20 cm/eeuw	1,2	1,2	1,3	1,9	3,4	7,8
60 cm/eeuw	1,6	1,6	1,7	2,2	4,2	8,9
85 cm/eeuw + storm	2,2	2,2	2,3	2,7	6,2	10,0

## 5.3 Gevolgen voor de functies

#### Veiligheid

In de Wet op de Waterkeringen is de voor primaire waterkeringen geldende veiligheidsnorm vastgelegd. Deze norm is aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste waterstand, de maatgevende hoogwaterstand (MHW), waarop de waterkering moet zijn berekend. Voor de zeewering is deze norm 1/10.000. Na 2000 worden de primaire waterkeringen elke 5 jaar opnieuw aan de veiligheidsnorm getoetst.

### **Dijken**

Met het ingebruik stellen van de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg op 10 mei 1997 is het laatste grote infrastructurele werk van het Deltaplan gerealiseerd. Voor harde constructies van het Deltaplan is bij het ontwerp rekening gehouden met een bepaalde mate, in de orde van 60 cm per eeuw, van zeespiegelstijging gedurende de levensduur. De zeeweringen zijn daarmee, ook bij de verwachte zeespiegelstijging, voldoende hoog en breed. De stabiliteit is daarmee in beginsel gegarandeerd.

Los van zeespiegelstijging en klimaatverandering werd het in het voorjaar van 1997 duidelijk dat de blokbekleding van de zeedijken onvoldoende zwaar is om de belasting veroorzaakt onder maatgevende omstandigheden (super storm) te kunnen weerstaan; de zeewering zal de toetsing in het kader van de Wet op de waterkering niet doorstaan op het onderdeel sterkte van de bekleding. Om de bekleding op het vereiste niveau te brengen is een herstelprogramma in gang gezet.

### **Duinen**

Met het uitbrengen van de 2<sup>e</sup> kustnota (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996) is het beheer van de duinen in relatie tot veiligheid gewijzigd. Het beheer tot het verschijnen van deze nota was in het algemeen gericht op het stringent handhaven van de zeereep (meest zeewaarts gelegen duinenrij) als primaire waterkering. Het gevolg hiervan was dat de duinen het karakter kregen van een strakke zanddijk.

De 2<sup>e</sup> kustnota gaat uit van een dynamisch kustbeheer. Dat wil zeggen dat het beheer ruimte geeft, daar waar mogelijk, aan natuurlijke processen, zoals verstuivingen en sluftervorming. Hiervoor is, bij gelijkblijvende veiligheidsnormen, een brede(re) waterkeringszone een randvoorwaarde. Essentieel voor de veiligheid bij een duinkust is dat de hoeveelheid zand in het kustsysteem constant blijft.

### **Buitendijkse gebieden, havens**

Buiten de waterkeringen liggen de zogenaamde buitendijkse gebieden. Dit betreft uiterwaarden, kwelders, havengebieden en buitendijks gelegen industrie- en woongebieden. Wat betreft havens en industriegebieden beslaat dit areaal een oppervlakte van circa 11.500 ha, voor woongebieden is dit ongeveer 1000 ha (Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1991).

In de buitendijkse gebieden zijn relatief veel chemische industrieën gevestigd. De kans op overstroming varieert hier ruwweg van 1/100 tot 1/10.000 per jaar. Onduidelijk is wat de gevolgen zijn van het onderlopen van buitendijksgebied (De Ronde, 1990).

Zonder extra maatregelen zullen buitendijkse gebieden frequenter overstroomen. De effecten van overstroming van deze gebieden worden thans in kaart gebracht. De eerste fase van dit onderzoek betreft een inventarisatie van de soort industrie die buitendijks is gevestigd, hoe groot de overstromingskans ter plaatse is en welke gevaren dit oplevert. Eind 1997 verschijnt de eerste rapportage omtrent de risico's van buitendijkse gebieden.

### **Ecologie**

In de Waddenzee en andere ondiepe getijdewateren is de biodiversiteit afhankelijk van de diversiteit aan ecotopen en de kwaliteit van deze ecotopen als leefgebied.

Verdieping zal over het algemeen leiden tot vermindering van het areaal intergetijdegebied en kwelders (schorren), en daarmee tot een afname van de biodiversiteit. Voor de kwaliteit van deze gebieden is vooral de sedimentdynamiek van belang. Hoog dynamische gebieden zijn soortarmer dan meer stabiele of laagdynamische gebieden. Snelle morfologische veranderingen zullen dan ook negatief kunnen uitpakken voor de biodiversiteit.

Naast morfologie in relatie tot zeespiegelstijging is de temperatuur zelf van groot belang voor de biodiversiteit. De temperatuur is een overheersende factor in de biogeografie. Er kunnen daardoor grote veranderingen plaatsvinden in de verspreidingsgebieden van organismen te gevolge van temperatuurstijging.

Overigens blijkt uit monitoring van kweldervegetaties in het dalingsgebied op Ameland dat de kwelderterrasvergetatie vooralsnog de bodemdaling goed kan bijhouden (Begeleidingscommissie Bodem daling Friesland, 1995).

Langs de Friese en Groningse kust is dit anders. Hier worden de voormalige landaanwinningswerken onderhouden om afslag te voorkomen of te compenseren, uit een oogpunt van zeedefensie en natuurbehoud. Een stijgende zeespiegel of dalende bodem zal de benodigde inspanning aan deze kwelderwerken waarschijnlijk vergroten (It Fryske Gea, 1994).

## 5.4 Maatregelen

### Zandsuppletie

Extra (hoeveelheid) zandsuppletie op de vooroever van onze kust blijft nodig om deze in de huidige vorm te kunnen handhaven. Onderzoek is nodig om na te gaan waar geschikt suppletiezand vandaan kan komen. Voor het suppleren op dieper water wordt de uitvoeringswijze geoptymaliseerd. Hierbij is van belang de erosiebestrijding in de ondiepe kustzone (strand) te combineren met suppletie in dieper water.

### Dynamisch kustbeheer

Om dynamisch kustbeheer vorm te kunnen geven zal, naast zandsuppletie aan de zeezijde, aan de landzijde ruimte geserveerd moeten worden om bij een zeespiegelstijging en een mogelijke verandering van het windklimaat nog aan de veiligheidsnormen te kunnen voldoen.

### Buitendijksgebied

Mogelijke maatregelen in deze gebieden om overstroming door zeespiegelstijging te voorkomen zijn omdijkking of ophoging van het terrein.

Daarnaast zullen bruggen opgehoogd moeten worden voor de scheepvaart, waarbij de opritten verlengd moeten worden, en tunnelingangnen verhoogd, waarbij een hogere omkading tegen instroming nodig is.

## 6. KENNISLEEMTEN EN ONDERZOEK

Bij het schatten van de gevolgen van klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdaling voor de waterhuishouding in Nederland zijn op een aantal punten, impliciet of expliciet, aannamen gedaan, dan wel aspecten buiten beschouwing gelaten. Voor een deel is dit het gevolg van de beperkte kennis die aanwezig is over de processen die hierbij van belang zijn. Dit betreft met name aspecten, die gerelateerd zijn aan klimaatverandering. Voor een deel betreft dit het schaalniveau van deze inventarisatie. Ten aanzien van bodemdaling lijkt op regionale schaal kennis en gegevens aanwezig te zijn om een kwantitatief beeld van de ontwikkelingen te krijgen. Op lokaal niveau kan het ontbreken van gedetailleerde, recente gegevens voor het uitvoeren van een adequaat waterbeleer een probleem geven.

De kennisleemten ten aanzien van klimaatverandering en in mindere mate zeespiegelstijging beperken de conclusies tot een indicatieve interpretatie. Klimaatscenario's hebben een grote mate van 'what-if' karakter.

Bij de bepaling van de gevolgen van de klimaatverandering op de waterhuishouding is, naast inzicht in de klimaatverandering zelf, van belang de kennis in de relatie tussen klimaat en waterhuishouding. Hierbij is het verschil in schaalniveau, in tijd en ruimtelijke zin, en de (beperkte) beschikbaarheid van gegevens een probleem. Bovendien is het huidige modelinventarium nog onvoldoende om alle genoemde effecten te kwantificeren.

### 6.1 Randvoorwaarden

#### Klimaat

Het vermogen van GCM's om regionale verwachtingen te maken, is wat betreft gemiddelden, extremen en het optreden van circulatie gebeurtenissen (bijv. droogteperioden), voor Europa sterk gekoppeld aan het vermogen om plaats en frequentie van circulatiepatronen juist weer te geven. Inzicht in dit vermogen ontbreekt waardoor de basis van klimaatvoorspellingen in Nederland grotendeels wegvalt. In sterke mate geldt dit voor het voorspellen van variabiliteit, met name wat betreft het windklimaat (windsnelheid en -richting). Deze leemte maakt het doen van concrete voorspellingen van zaken als stormfrequenties, stormintensiteiten en daaruit afgeleide grootheden als stormvloedfrequenties aan de kust en windopzet op het IJsselmeer nog niet mogelijk.

Indien bovenstaande problematiek opgelost zou zijn dan is de tijd en ruimteschaal van de GCM's te groot om voorspellingen op Nederlandse schaal te maken. Daarnaast vereist het doorrekenen van de responsie van water-/ecosystemen klimaatgrootheden die niet door GCM's geleverd kunnen worden. Om dit op te lossen zijn lokale klimaatscenario's noodzakelijk van het type zoals in dit rapport gehanteerd. Het ontwikkelen van dit type scenario's is tot op heden alleen voor neerslag gebeurd en beperkt gebleven tot het Nederlandse stroomgebied. Inzichten in de toekomstige verdamping is een belangrijke ontbrekende schakel bij het doen van voorspellingen omtrent grondwatersituaties en extreme hoge of lage rivierafvoeren.

#### Zeespiegelstijging

Voor de bepaling van het totaal effect van de verwachte versnelde zeespiegelstijging worden de bijdragen van thermische expansie, veranderingen van

gletsjers en ijskappen, veranderingen in de massa's landijs van Groenland en de verandering in de massa's landijs van Antarctica gesommeerd. De huidige modellen zijn niet in staat om de verschillende bijdragen van de zeespiegelstijging voldoende nauwkeurig weer te geven. Met name de invloed van de klimaatverandering op de massabalansen van de ijskappen is bij benadering bekend.

De waargenomen autonome zeespiegelstijging van 20 cm per eeuw is met de huidige modellen slechts voor een deel te verklaren.

#### **Bodemdaling**

Bij grondwateronttrekkingen in gebieden met samendrukbare lagen kan zetting optreden. Vaak wordt vooraf de mogelijke zetting berekend met het oog op de te nemen voorzorgsmaatregelen. Er bestaat geen overzicht van gemeten zettings, zodat een beeld over de werkelijk optredende zettings ontbreekt. Aanpassingen van polderpeilen in veengebieden kan schade aan wegen en gebouwen ten gevolge hebben. Een overzicht over de omvang van de problematiek, met name de financiële aspecten, ontbreekt (provinsje Fryslan, 1997).

## **6.2 Waterhuishouding**

#### **Rivieren**

Voor klimaat-effect studies van de stroomgebieden van Rijn en Maas zijn klimaatscenario's met een fijner tijd en ruimtelijk oplossend vermogen (met name voor de neerslag) nodig. Op dit moment is de kennis over extreme meteorologische situaties en hieruit voortvloeiende kansen op extreme rivierafvoeren nog onvoldoende. Voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses voor klimaatverandering dient het bestaande instrumentarium voor modellering van de afvoer van de grote rivieren verbeterd te worden. De optimale ruimtelijke en temporele schaal van de modellen zijn daarbij wezenlijke aandachtspunten.

#### **Benedenrivierengebied**

Op dit moment is nog te weinig kennis beschikbaar voor kwantitatieve inschatting van de effecten van veranderingen in rivierafvoer en zeespiegelstijging op de hydrologie en morfologie van het benedenrivierengebied. Met name de lange termijn veranderingen in morfologie en de gevolgen hiervan voor de veiligheid vergen nader kwantitatief onderzoek.

#### **IJsselmeer**

Gezien de onzekerheden omtrent een toekomstig windklimaat zijn de gevolgen voor de maatgevende kruinhoogten voor specifieke dijklocaties nog niet goed in te schatten.

#### **Regionale systemen**

Voor een algemeen overzicht zijn de effecten van bodemdaling en klimaatverandering voor de waterhuishouding van de regionale systemen voldoende kwantificeerbaar, met uitzondering van de zoet watervoorziening ten gevolge van lage rivierafvoeren.

De gevolgen voor individuele systemen is maar voor een deel bekend. De ba-

sisgegevens lijken in voldoende mate aanwezig om de gevolgen in beeld te brengen. Nadere aandacht is hierbij nodig voor de wisselwerking tussen de effecten van klimaatverandering, bodemdaling en mogelijke maatregelen.

### **Kust**

De relatie tussen dynamisch kustbeheer en de ruimtelijke ontwikkelingen is nog niet voldoende kwantitatief aan te geven en moet verder uitgewerkt worden. Eventuele veranderingen in het windklimaat kunnen hierop van grote invloed zijn.

## **6.3 Lopend onderzoek**

### **Klimaat**

#### *Neerslaggenerator*

Op dit moment ontwikkelen het KNMI en het RIZA een neerslaggenerator op statistische grondslag voor het Rijngebied met als doel de extreem statistiek van de afvoer van de Rijn aan te scherpen. Deze neerslaggenerator bevat vooralsnog niet de mogelijkheid om klimaatverandering te verdisconteren.

#### *Klimaatvoorspelbaarheid van Europa*

Op mondiale schaal wordt gewerkt aan het verbeteren van de GCM's. Binnen het KNMI zijn studies gaande over de natuurlijke variabiliteit van het Atlantische gebied en in samenhang hiermee over de intrinsieke voorspelbaarheid van het West-Europese klimaat. Het betreft een langlopend onderzoek met een fundamenteel karakter.

### **Bodemdaling**

De Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat heeft het voornemen om uiterlijk in het jaar 2000 een Actueel Hoogtebestand van Nederland aan te maken (AHN), gebaseerd op hoogtemetingen vanuit vliegtuigen, met een zeer hoge opnamedichtheid (Unie van Waterschappen, 1997).

### **Rivieren en IJsselmeergebied**

#### *NOP-project Waterhuishouding Nederland*

Door het RIZA wordt binnen het Nationaal Onderzoekprogramma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP-2) nader onderzoek verricht naar de effecten van klimaatveranderingen op de waterhuishouding van Nederland. Hierbij zal de gevoeligheid van de deelsystemen (rivieren, IJsselmeer, bendenrivierengebied en de regionale gebieden) en hun functies voor klimaatveranderingen in hun onderlinge samenhang nader onderzocht worden. De eerste resultaten van het NOP onderzoek zijn in dit rapport verwerkt. Dit onderzoek heeft raakvlakken met andere onderzoeksprojecten, zoals het hydrologisch onderzoek dat in internationaal verband binnen het Rijngebied verricht wordt en de onlangs door Rijkswaterstaat gestarte verkenning van de toekomstige waterhuishouding van het IJsselmeergebied, het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (Waterhuishouding in het Natte Hart).

#### *Hydrologische modellering stroomgebieden*

De komende jaren wordt verder onderzoek verricht naar het verbeteren van het instrumentarium om de gevolgen van klimaatveranderingen (en directe mense-

lijke ingrepen in de stroomgebieden) op de hydrologie van de Rijn en de Maas te analyseren. Dit onderzoek wordt verricht door het RIZA in samenwerking met universiteiten en andere onderzoeksinstututen, en vindt mede in internationaal verband plaats.

#### **Regionale systemen**

De provincie Friesland verricht onderzoek naar de effecten van zeespiegelstijging en bodemdaling op de waterhuishouding en de mogelijke maatregelen om op de veranderingen te anticiperen. Voor de Friese boezem worden, in samenwerking met het waterschap Friesland, mogelijke maatregelen voor het waterkwantiteitsbeheer doorgerekend (provincie Friesland, 1994).

De provincie Zuid-Holland, in samenwerking met de Zuidhollandse waterschappen, is recent gestart met een toekomstverkenning op basis van gesignaleerde ontwikkelingen en de gevolgen voor het waterbeheer. Hierbij komen bodemdaling en klimaatverandering expliciet aan de orde (provincie Zuid-Holland, 1997).

#### **NOP-project beek eco-systemen**

Recent is een NOP-2 studie gestart door de Dienst Lanbouwkundig Onderzoek (SC-DLO en IBN-DLO) naar klimaatveranderingen en de kwetsbaarheid van beek eco-systemen (Van Walsum, 1996).

#### **Kust**

De regionale beheerders zijn gestart met (voorbereidingen van) een aantal proefprojecten 'dynamisch kustbeheer', waarbij de provincie de regie voert. Van rijkszijde vindt actieve ondersteuning plaats.

## 7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Klimaatverandering is een langzaam verlopend proces, dat versluierd wordt door de grote variabiliteit in het weer. Op termijn van decennia kan een systematische klimaatverandering echter grote invloed hebben op de waterhuishouding van Nederland. Kleine veranderingen in gemiddelde waarden of in de spreiding leiden tot grote veranderingen in kansen op extremen. Deze extremen zijn vaak maatgevend.

Er bestaan onzekerheden over de mate en snelheid van klimaatverandering, met name waar het veranderingen in variabiliteit betreft. Daarnaast is de vertaling van mondiale veranderingen naar regionale en lokale schaal moeilijk. Dit betekent dat klimaat-effect studies het karakter van gevoeligheidsanalyses hebben. Deze studies berusten op schattingen van een onder- en boven-grens en een centrale schatting wat betreft veranderingen in gemiddelden, aangevuld met een aantal aannamen wat betreft variabiliteit.

Bodemdaling is een proces dat zich onafhankelijk van klimaatverandering voltrekt. Naast natuurlijke processen wordt de bodemdaling veroorzaakt door menselijk handelen, te weten mijnbouwkundige activiteiten en ontwatering van veen- en kleigronden. De huidige maatregelen om daling ten gevolge van mijnbouw te ondervangen zijn in het algemeen, ook op termijn, afdoende. De waterbeheersmaatregelen om de gevolgen van bodemdaling door oxydatie en/of klink van veen- en kleigronden te ondervangen zijn tevens de oorzaak van verdere bodemdaling. Bij gelijkblijvend beleid zal dit leiden tot een steeds toenemende intensivering van de huidige waterbeheersmaatregelen.

De huidige onderzoeksresultaten naar klimaatverandering geven geen aanleiding tot directe en grootschalige inzet van maatregelen. Wel geven zij een indicatie voor de aard van de maatregelen die de komende decennia genomen moeten worden. Om een duurzame kwaliteit van de watersystemen te handhaven moet nu al geanticipeerd worden op toekomstige klimaatveranderingen. De natuurlijke veerkracht van de kust- en riviersystemen dient verhoogd te worden om zich aan te kunnen passen aan de veranderende randvoorwaarden. Voor de toekomst is reservering van extra ruimte nodig voor het water in de rivier, in de beeksystemen en in de kustzone. Het ruimtelijke ordeningsbeleid zal moeten voorzien in de planologische invulling van deze reserveringen.

In poldergebieden waar het waterbeheer gericht is op het ondervangen van bodemdaling zal bij het huidige grondgebruik een meer natuurlijk waterbeheer momenteel niet mogelijk zijn. Om op termijn ruimte te creëren voor het toepassen van meer duurzame waterbeheerstrategieën moeten bij de huidige planologische invulling gebieden ontzien worden die onder druk staan wat betreft bodemdaling, verzilting en wateraanvoer.

Vanwege de grote mate van onzekerheid en het anticiperende karakter van het voorgenomen beleid is monitoring van de processen, de toestand van en de ontwikkelingen in de watersystemen van essentieel belang om tijdig maatregelen te kunnen voorbereiden. Hiermee wordt tevens de systeemkennis vergroot, waarmee de betrouwbaarheid van inschattingen groter wordt en maatregelen effectiever kunnen worden uitgevoerd.

## LITERATUUR

Begeleidingscommissie Bodemdaling Friesland (1995). Monitoring, effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; eerste evaluatie na acht jaar gaswinning. NAM, Assen.

Berger, H.E.J., S.J. Ras en P.J.M. Wondergem (1997). Beschermen tegen hoogwater. Achtergronddocument vierde Nota waterhuishouding. Projectteam NW4, 's-Gravenhage.

Bijl, W. (1996). Looking for observational signs of "Changing Storminess". report RIKZ/OS-96.157x, 's-Gravenhage.

Bol, R. (1993). Zout, maar niet te zout...! Onderzoek naar een nieuw bedieningsprogramma voor de Haringvlietsluizen (HV2min) in het kader van het Integraal Beleidsplan Haringvliet-Hollandsch Diep-Biesbosch. RIZA nota 93.009. Rijkswaterstaat/RIZA, Dordrecht.

Brandsma, Th. (1995). Hydrological Impact of Climate Change. A sensitivity study for the Netherlands. Thesis. Technische Universiteit Delft, Delft.

Carter, D.J.T. en Draper, L. (1988). "Has the north-east Atlantic become rougher?". Nature, Vol. 332, p. 494.

Claessen, F.A.M., A.J. van Bruchem, G. Hannink, J.C. Hulsbergen en E.F.J. de Mulder (1989). Proceedings KNMG symposium "Coastal Lowlands, Geology and Geotechnology", 1987, pp. 283-291. Geologie en Mijnbouw, 's-Gravenhage.

Commissie Hydrologisch Onderzoek, 1989. Water in the Netherlands. CHO TNO, Delft.

Dooremolen, W.A. van, A. van der Scheer en H.J. Winkels (1996). Waarnemingen en prognoses van de maaiveldsdaling in Flevoland. Flevobericht nr. 388. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied, Lelystad.

Fugro, (in voorbereiding). Methodiek voor de bepaling van het vereiste veiligheidsniveau van boezemkaden. Fugro, Nieuwegein.

Geenhuizen, M. van, G.J. Muilerman en R.C.E.M. van der Heijden (1996). BERTRANC: Een peiling van aanpassingen in de binnenvaart bij extreme waterstanden. Faculteit Technische Bestuurskunde, Technische Universiteit Delft, Delft.

Groenewoudt, B.J. (1994). Prospectie, Waardering en Selectie van archeologische vindplaatsen. Een beleidmatige verkenning van middelen en mogelijkheden. Stichting Rijksdienst voor Oudheidkundig Bodemonderzoek, Amersfoort.

IPCC (1995). Second Assessment Report of Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge.

It Fryske Gea (1994). Noord Friesland Buitendijks. Rapport van de werkgroep Noord-Friesland Buitendijks. It Fryske Gea, Olterterp.

Janssen, H en J. Halbersma (1996). Maaivelddaling en waterbeheer; een bouwsteen voor de vierde Nota Waterhuishouding. Dienst Landelijk Gebied/provincie Zuid-Holland, Voorburg/'s-Gravenhage.

Koeze, R.D. (1995). MER Haringvlietsluizen. Toepassing van het Regionaal Waterkwaliteitsmodel voor de Zuidrand van het Noordelijk Deltabekken. Waterloopkundig Laboratorium, WL rapport T1623, Delft.

Können, G.P. en W. Fransen (ed.) (1996). De toestand van het klimaat in Nederland. KNMI, De Bilt.

Können, G.P., W. Fransen, R. Mureau (1997). Meteorologie ten behoeve van de Vierde Nota Waterhuishouding. KNMI, De Bilt.

Kors, A.G., F.A.M. Claessen, J.A.P.H. Vermulst, R. van Ek, H.B. Bos, K.E. Boven, W.J. de Lange en G.E. Arnold (1997). Beleidsanalyse Watersysteem verkenningen: themarapport verdroging en grondwater. RIZA-rapport 97.\*\*\*, Lelystad.

Kwadijk, J. (1993). The impact of climate change on the discharge of the river Rhine. Thesis. Netherlands Geographical Studies, no. 171, Utrecht.

Kwakernaak, C., P.J.T. van Bakel, B.W. Parmet, L.D. Boel, E. Dammers, J.W.J. van der Gaast, R. van der Veen en F. de Vries (1996). Waterberging Binnendijks. SC-DLO/RIZA, Wageningen.

Lorenz, G.K., W. Groenewoud, F. Schokking, M.W. v.d. Berg, J. Wiersma, F.J.J. Brouwer, S. Jelgersma (1991). "Heden en verleden, Nederland naar beneden???", interim-rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland. Meetkundige Dienst en Rijks Geologische Dienst, Delft/Haarlem/Rijswijk.

Meij, J.C. van der, B. Minnema en H.S. Nieuwenhuis (1994). Onderzoek Waterhuishoudkundige Inrichting Friesland, Fase 2. TNO rapport nr. OS 94-62B, Delft.

Middelkoop, H. (1997). Embanked floodplains in the Netherlands. Geomorphological evolution over various time scales. Thesis. Netherlands Geographical Studies no.224, Utrecht.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1989). Derde Nota waterhuishouding. Water voor nu en later. Aangeboden aan de voorzitter van de Tweede Kamer, d.d. 31 augustus 1989. SDU, Den Haag.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1990). Kustverdediging na 1990. Aangeboden aan de voorzitter van de Tweede Kamer, d.d. 14 juni 1990.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1996). Achtergrondnota Toekomst voor Water. Project Watersysteemverkenningen. RIZA nota 96.058.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1996). Kustbalans 1995. Aangeboden aan de voorzitter van de Tweede Kamer, d.d. 15 april 1996.

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (1996). Vervolgnota Klimaatverandering. Aangeboden aan de voorzitter van de Tweede Kamer, d.d. 24 juni 1996.

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1996). Beleidslijn ruimte voor de rivier. Aangeboden aan de voorzitter van de Tweede Kamer, d.d. 18 april 1996.

Mitchell, J.F.B., C.A. Senior en W.J. Ingram (1989). CO<sub>2</sub> and climate: a missing feedback. Nature, Vol. 341, pp. 132-134.

Mitchell, J.F.B., S. Manabe, V. Meleshko en T. Tokioka (1990). Equilibrium climate change and its implications for the future. In: J.T. Houghton et al (eds.), Climate change: the IPCC scientific assessment. Cambridge University Press., pp. 137-164, Cambridge.

Nomden, E. (1997), Een goed klimaat voor de binnenvaart? Rapport BERTRANC. Gemeentelijk Haven Bedrijf, Rotterdam.

Parmet, B.W.A.H., J. Kwadijk en M. Raak (1995). Impact of climate change on the discharge of the river Rhine. In: S. Zwerver et al (eds.), Climate change Evaluation and Policy implications. Elsevier, pp. 911-918, Amsterdam.

Parmet, B.W.A.H. en M. Burgdorffer (1996), Extreme discharges of the Meuse in the Netherlands: 1993, 1995 and 2100 - Operational forecasting and long term expectations. RIZA, Arnhem.

Postma, R., M.J.J. Kerkhofs, B.G.M. Pedroli en J.G.M. Rademakers (1995). Een stroom natuur, Natuurstreefbeelden voor Rijn en Maas. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, project Watersysteemverkenningen, RIZA nota nr. 95060, Lelystad.

Provincie Friesland (1994). Tussenrapportage van het strategisch onderzoek naar de waterhuishoudkundige inrichting van Friesland, Leeuwarden.

Provincie Friesland (1997). Maaivelddaling in de Friese Veengebieden en de gevolgen voor bebouwing en infrastructuur (in voorbereiding), Leeuwarden.

Provincie Zuid-Holland (1997). Startnotitie project Bruisend Water. 's-Gravenhage.

Provinsje Fryslan (1997). Indicatie van de kosten als gevolg van oxidatie en klink van veen in de provinsje Fryslan. Heidemij Advies, Assen.

Pulles, J.W. (1985). Beleidsanalyse van de waterhuishouding van Nederland - PAWN. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 's-Gravenhage.

Rijks Geologische Dienst (1989). Zettingsgevoeligheidkaart provincie Friesland, rapport RGD BP 10696, Haarlem.

Rijksinstituut voor Kust en Zee (1995). De kust in breder perspectief. Basisrapport kustnota 1995. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rapport RIKZ/95-005, 's-Gravenhage.

Rolf, H.L.M. (1991). Evaluatie van de stijghoogte van het diepe grondwater in de Roerdalslenk (Midden-Limburg). TNO Milieu en Energie, Rapport OS91-48B, Delft.

Ronde, J.G. de en J.A. Vogel (1988). Zeespiegelrijzing. Technisch rapport no. 6 in de serie Kustverdediging na 1990. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, nota GWAO 88.015, 's-Gravenhage.

Ronde, J.G. de (1990). Wassend water. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, nota GWAO 90.015, 's-Gravenhage.

Ronde, J.G. de (1996). Man-made projects and relative sea-level rise. In: John D. Milleman en Bilal U. Haq (eds.), Sea-level rise and coastal subsidence. Kluwer, Dordrecht.

Schokking, F. (1993). Maaiveldaling in veenweidegebieden in de provincie Friesland. Rijks Geologische Dienst rapport nr.10981, Haarlem.

Silva, W. en M. Kok (1996). Integrale Verkenning Inrichting Rijntakken. Hoofdrapport: Een weegschaal voor rivierbeheer. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, IVR-rapport 1, RIZA/WL, Arnhem.

Stuurman, R. (1996). Landelijke Hydrologische Systeemanalyse Brabant-Limburg. NUTG-TNO, Delft.

Swart (1996). Verzilting in noord Friesland, een hanteerbaar verschijnsel! provincie Friesland, Leeuwarden.

Unie van Waterschappen (1997). Rapport Actueel Hoogtebestand Nederland. Unie van Waterschappen, Den Haag

Veltman, S. (1996). Het gebruik van geografische informatiesystemen & geostatische interpolatietechnieken bij LBL-Zuid-Holland. Vakgroep Fysische Geografie, Rijks Universiteit Utrecht, Utrecht.

Walsum, P.E.V. van (1996). Projectbeschrijving research programma on Global Air Pollution and Climate Change. SC-DLO, Wageningen.

Vermulst, J.A.P.H., F.A.M. Claessen, A.T. Blonk en T. Slot (1997). Effecten van bodemdaling, klimaatverandering en zeespiegelstijging op de grondwatersituatie in Nederland. RIZA-rapport 97.\*\*, Lelystad.

Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1991). Impact of Sea Level Rise on Society; a case study for the Netherlands. Nota GWAO 90-016, Delft/'s-Gravenhage.

Waterloopkundig Laboratorium en Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1992). Analysis of vulnerability to the impact of a rise in sea level; Resource Analysis. DGW-rapport 93.034, Delft.

Waterschap Friesland (1997). Onderzoek naar de gevolgen van zeespiegelstijging en bodemdaling op de Friese boezem (modelberekeningen kwantiteit), Leeuwarden.

Wereld Natuur Fonds (1992). Levende Rivieren. WNF, Zeist.

Wildt, P.J.W. de, G.P. Können (1996). Hydrologie en klimaatverandering. Het Waterschap, 6, 1996.

Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom, A.F. van Holst (1988). Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart 1:250.000, ten behoeve van de PAWN-studie. Rapport nr.2055. STIBOKA, Wageningen.

## **BIJLAGEN**

### **Bijlage 1 KNMI-scenario**

In het kader van de vierde Nota waterhuishouding is door het KNMI een schatting gemaakt voor een aantal, voor de waterhuishouding van Nederland relevante, klimaatparameters. De resultaten hiervan zijn in deze bijlage weergegeven (Können et al, 1997).

#### **Directe parameters**

- Het klimaat van Nederland zal de komende eeuw wijzigingen ondergaan. IPCC geeft een wereldgemiddelde temperatuurverhoging aan van 1 - 3,5°C voor eind volgende eeuw, met als centrale schatting 2°C. De toename in wereldwijdgemiddelde neerslag wordt op enkele procenten geschat. Voor 2050 zijn de toenamen ongeveer de helft van bovengenoemde waarden. Indien men de factor twee onzekerheidsband interpreteert als een  $2\sigma$  schatting, bedraagt de kans 2,5% dat de wereldwijde temperatuurtoename in 2100 meer dan 3,5°C zal zijn.
- Verhoging van de wereldtemperatuur zal repercussies hebben op het Nederlandse klimaat. Hoe dit doorwerkt is niet exact bekend, daar niet met voldoende nauwkeurigheid bekend is hoe de luchtcirculatiepatronen zich wijzigen. Indien als nulhypothese wordt aangehouden dat geen verandering hierin optreedt, is de temperatuurverhoging voor Nederland 0,5 - 2°C voor 2050 en 1 - 4°C voor 2100. Gezien de onderzekerheid in de nulhypothese en de variabiliteit van het W-Europese klimaat moet aan de factor twee onzekerheid een minstens twee maal grotere overschrijdingskans worden toegekend als bij de wereldtemperatuur. De temperatuurverhoging zal de komende decennia merkbaar aanwezig zijn in het Nederlandse weer.
- Het Nederlandse klimaat blijft variabel. Hittegolven blijven zeldzaam. Strenge winters worden minder streng en kunnen zich minder ver in het vroege voorjaar doorzetten. Thans ligt de grens voor extreme winterkoude op circa 1 maart; rond 2050 kan deze een aantal dagen teruggeschoven zijn.
- De neerslaghoeveelheid neemt toe. Per graad verhoging bedraagt de toename in jaarlijkse neerslag 3%. De toename concentreert zich vrijwel geheel in het winterhalfjaar, zodat per graad verhoging 6% meer neerslag valt in dit seizoen. In de zomer is de schatting 1% per graad.
- De neerslagintensiteit van de zware zomerbuien neemt toe met 10% per graad. Onder de aanname van behouden dauwpuntdepressies blijft hun frequentie gelijk.
- De toename van winterneerslag in langdurige neerslagsituaties wordt eveneens op 10% per graad geschat, waarbij de helft wordt veroorzaakt door toename van de neerslagduur en de helft door toename van de intensiteit. Over veranderingen in frequenties van zulke situaties is binnen de nulhypothese geen uitspraak te doen.
- Over veranderingen in stormfrequenties is niets bekend. Als werkhypothese is de natuurlijke variabiliteit van het lopend 15-jaargemiddelde als marge aan te houden. Deze variabiliteit bedraagt 5% naar beide kanten.

- Het is denkbaar dat de Nederlandse temperatuurverhoging door een broeikas-gerelateerd circulatie-effect voor- of naloopt op het wereldwijde effect. Als schatting voor de toename in neerslag kan in eerste benadering het getal worden gehanteerd dat tot stand komt bij de nulhypothese. De intensiteit van zware zomerbuien blijft echter gerelateerd aan de Nederlandse temperatuur.

#### Indirecte parameters

Schattingen over indirecte parameters komen hier tot stand als afgeleiden van bovenstaande. Hierbij zijn de frequenties van meteorologische systemen (buien etc.) constant gehouden. Voor deze aanname bestaat geen wetenschappelijke onderbouwing. Hierdoor moeten de parameters gezien worden als eerste-orde werkschattingen. De huidige wetenschappelijke stand van zaken laat geen hogere precisie toe.

- IJsdijken: het aantal dagen met ijsbedekking > 7, 12 en 15 cm neemt gelijk af voor deze drie grenzen. De afname bedraagt resp. 35%, 60% en 85% bij temperatuurverhogingen van 1°, 2° en 4°. Dit resultaat komt tot stand door alle dagen in een waarnemingsreeks met deze temperaturen te verhogen.
- Herhalingstijden neerslag, extreme hoeveelheden: de toename in extremen bij vaste herhalingsfrequentie, volgt uit de directe parameters. De verandering in overschrijdingsfrequentie van vaste neerslaggrenzen volgt uit de verdeling. Deze zijn in tabel 6 opgegeven. Hierbij is als uitgangspunt bij de 5-minuten en 10-dagen grens, gesteld dat de frequentie van gebeurtenissen ongewijzigd blijft.

#### Onzekerheden

Tabel 6 geeft een richtlijn voor de verandering in diverse grootheden. De toename in neerslag zijn voorwaardelijke getallen die uit neerslag-temperatuurverbanden volgen. Een veiligheidsmarge van een factor twee is raadzaam. De getallen geven de huidige stand van zaken rond een aantal grootheden. Deze dekken slechts een deel van de hydrologisch relevante klimaatgrootheden. Structureel onderzoek is noodzakelijk om de robuustheid van de getallen te verhogen en de aansluiting op hydrologische parameters te garanderen. Dit onderzoek heeft een langjarig karakter. Geadviseerd wordt om vooruitlopend op NW-5 dit onderzoek op te starten.

Tabel 6 Temperatuur, ijsdikte en neerslag

	2050 centrale schatting 2100 ondergrens	2050 boven grens 2100 centrale schatting	2100 boven grens
temperatuur	1°	2°	4°
jaarneerslag	+3%	+6%	+12%
zomerneerslag	+1%	+2%	+4%
winterneerslag	+6%	+12%	+25%
neerslagintensiteit in buien	+10%	+20%	+40%
lange neerslagperiode in winter	+10%	+20%	+40%
stormfrequenties	± 5% over alle temperatuurschattingen		
IJsdagen $\geq 7$ cm	-33%	-54%	-81%
$\geq 12$ cm	-34%	-60%	-85%
$\geq 15$ cm	-37%	-63%	-88%
5-minuten neerslag, NL	+10% bij vaste frequen- tie	+20%	+40%
herhaaltijd 1 yr (6 mm)	0,7 yr bij zelfde hoe- veelheid	0,6 yr	0,5 yr
herhaaltijd 10 yr (10 mm)	7 yr	5 yr	2 yr
herhaaltijd 100 yr (15 mm)	60 yr	30 yr	20 yr
30-minuten neerslag, NL	+10%	+20%	+40%
herhaaltijd 1 yr (12 mm)	0,8 yr	0,7 yr	0,5 yr
herhaaltijd 10 yr (22 mm)	7 yr	5 yr	3 yr
herhaaltijd 100 yr (34 mm)	53 yr	32 yr	14 yr
24-uur neerslag, NL	+3%	+6%	+12%
herhaaltijd 1 yr (34 mm)	0,9 yr	0,8 yr	0,65 yr
herhaaltijd 10 yr (53 mm)	8 yr	7 yr	5 yr
herhaaltijd 100 yr (73 mm)	78 yr	62 yr	40 yr
10-dagen neerslag, winter NL	+10%	+20%	+40%
herhaaltijd 1 yr (62 mm)	0,7 yr	0,5 yr	0,2 yr
herhaaltijd 10 yr (98 mm)	6 yr	4 yr	2 yr
herhaaltijd 100 yr (136 mm)	47 yr	25 yr	9 yr
10-dagen neerslag, winter België	+10%	+20%	+40%
herhaaltijd 1 yr (79 mm)	0,7 yr	0,5 yr	0,35 yr
herhaaltijd 10 yr (117 mm)	5 yr	3 yr	2 yr
herhaaltijd 100 yr (147 mm)	32 yr	14 yr	5 yr

## Bijlage 2 UKHI-scenario

Veranderingen in temperatuur en neerslag volgens de UKHI scenario's in verschillende delen van het Rijngebied bij verschillende wereld-gemiddelde temperatuurstijgingen.

wereld-gemiddelde temperatuurstijging	Alpengebied			Midden Duitsland			Laagland gebied		
	jaar	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar	winter	zomer
+1 °C   dT(°C)	1.0	1.1	0.9	1.0	1.1	0.8	0.9	1.0	0.8
dP(%)	0.8	3.9	-2.3	2.4	5.7	-0.9	5.1	7.6	2.5
+2 °C   dT(°C)	2.2	2.3	2.0	2.1	2.4	1.9	1.9	2.2	1.7
dP(%)	1.8	8.6	-5.1	5.4	12.6	-1.9	11.3	16.9	5.6
+4 °C   dT(°C)	4.2	4.5	3.9	4.1	4.5	3.6	3.8	4.3	3.2
dP(%)	3.4	16.6	-9.8	10.3	24.3	-3.7	21.8	32.7	10.9

### Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in 2050

Verwachte bodemdaling in 2050 als gevolg van klink en oxydatie voor diverse bodemfysische eenheden.

Bodemfysische eenheid	Verwachte bodemdaling in 2050 (m)
<b>Veengronden:</b>	
- met veraarde bovengrond (koopveengronden)	0.45
- met veraarde bovengrond en zand in de ondergrond (koop- en madeveengronden)	0.45
- met een kleidek (waardveengronden en weideveengronden)	0.45
- met een kleidek en zand in de ondergrond (waardveengronden)	0.45
- met een zanddek en zand in de ondergrond (meerveengronden)	0.00
<b>Kleigronden:</b>	
- homogene zavelgronden	0.10
- homogene, lichte kleigronden	0.15
- kleigronden met een zware tussenlaag of ondergrond	0.30
- kleigronden op veen (drechtvaaggronden)	0.45
- klei op zandgronden	0.00
<b>Zandgronden:</b>	
- podzolen, eerdgronden en duinvaaggronden	0.00

## Bijlage 4 Ontwikkelingsvarianten regionale watersystemen

In het kader van de vierde Nota waterhuishouding zijn door het RIZA met behulp van het modelinstrumentarium dat eerder is toegepast bij de Watersysteemverkenningen berekeningen gemaakt ten aanzien van de effecten van bodemdaling en klimaatverandering op de regionale watersystemen in Nederland. De uitgangspunten bij deze berekeningen zijn in deze bijlage weergegeven (Vermulst et al, 1997).

### **Uitgangspunten**

#### *Bodemdaling*

Wat betreft de bodemdaling is een schatting gemaakt voor 2050, rekening houdend met:

- de daling van Holocene afzettingen: per bodemtype is een daling aangenomen variërend tussen 0 en 60 cm (zie bijlage 3);
- dalingen als gevolg van gaswinning in Groningen: er is gebruik gemaakt van een bestand afkomstig van de NAM, met dalingen van maximaal 36 cm;
- de tektonische 'kanteling' van Nederland. Hiervoor is gebruik gemaakt van een bestand met de bodembeweging van de Pleistocene ondergrond (afkomstig van de Meetkundige Dienst). Voor 2050 geldt een maximale daling van ongeveer 6 cm in het noordwesten en een maximale stijging in het zuidoosten van ongeveer 6 cm.

#### *Zeespiegelstijging*

Wat betreft zeespiegelstijging en verandering van rivierstanden is in eerste instantie uitgegaan van de centrale schatting van het IPCC voor 2050:

- in 2050 is er sprake van 25 cm zeespiegelstijging, waarvan 15 cm is toe te schrijven aan een versterkt broeikaseffect en 10 cm aan een autonome stijging van de zeespiegel (natuurlijke overgang van de Kleine IJstijd naar een warmere periode). Voor scenario 1 (excl. versterkt broeikaseffect) wordt dus een stijging van 10 cm aangenomen, voor scenario 2 een stijging van 25 cm.
- de peilverhoging in het Deltagebied is gelijk aan de zeespiegelstijging: 10 cm respectievelijk 25 cm.
- het IJsselmeer krijgt een stijging van 5 cm (scenario 1) resp. 22 cm (scenario 2).
- de rivierstanden in Rijn, Waal en IJssel veranderen niet (scenario 1) respectievelijk dalen met 8 cm (scenario 2).
- de Maas is grotendeels gestuwd. Daarom zijn geen veranderingen in de rivierstanden in de Maas doorgevoerd.

#### *Verandering neerslag en verdamping*

Wat betreft de verandering van de neerslaghoeveelheden is uitgegaan van de schattingen van het KNMI (zie bijlage 1, centrale schatting voor 2050). De verwachte temperatuurstijging voor 2050 bedraagt 1°C. De toename van de neerslag varieert tussen 6% in de winter en 1% in de zomer en over het hele jaar gezien 3%. M.b.v. de formule van Penman is de potentiële verdamping berekend, behorende bij een temperatuurstijging van 1°C (Brandsma, 1995). De potentiële verdamping neemt toe met ongeveer 12% in de winter, 3,3% in de zomer en over het hele jaar gezien 3,9%. Door de verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie zal de gewasverdamping naar verhouding afnemen, omdat de huidmondjes eerder sluiten. Dit effect is in de modellering van de evapotranspiratie meegenomen; de berekende werkelijke verdamping voor 2050 bedraagt dan nauwelijks meer dan in de huidige situatie.

## Bijlage 5 Werkgroep klimaatverandering en bodemdaling - NW4

De werkgroep was als volgt samengesteld:

ir. A.J. Elshof, voorzitter (Unie van Waterschappen);  
ir. P.H. Beuse (Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland);  
drs. F.A.M. Claessen (Rijkswaterstaat, RIZA);  
ing. J.H. Eikelenboom (provincie Noord-Holland, afdeling Water);  
drs. W. Fransen (KNMI);  
J. Halbersma (provincie Zuid-Holland, afdeling Waterstaatszaken);  
ir. F.P. Hallie (Rijkswaterstaat, hoofd-directie);  
ing. H. Janssen (Dienst Landelijk Gebied, Zuid-Holland);  
dr. G.P. Können (KNMI);  
ir. J. Lindenberg (Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde);  
drs. A. Lokhorst (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO);  
dr. H. Middelkoop (Rijkswaterstaat, RIZA);  
drs. R. Mureau (KNMI);  
ir. H.S. Nieuwenhuis (provincie Friesland, afdeling Milieu en Water);  
ir. B.W.A.H. Parmet (Rijkswaterstaat, RIZA);  
ir. J.G. de Ronde (Rijkswaterstaat, RIKZ);  
ir. J.A.P.H. Vermulst (Rijkswaterstaat, RIZA);  
ir. P.J.W. de Wildt (KNMI).

